

Propriétés physicochimiques de 43 biochars

1^{ER} MARS 2018

RAPPORT TECHNIQUE
CRMR-2018-SA1

 **GECA**
ENVIRONNEMENT



CENTRE DE RECHERCHE
SUR LES MATÉRIAUX
RENOUVELABLES

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

PROPRIÉTÉS PHYSICOCIMIQUES DE 43 BIOCHARS

Rapport technique

Production conjointe de
l'Université Laval et GECA Environnement

Équipe de production

Sébastien F. Lange, Ph.D., Biopterre
Suzanne E. Allaire, Ph.D., GECA Environnement et U. Laval
Anaïs Charles, Ph.D., IRDA
Isabelle Auclair, M.Sc., UQTR
Catherine Bajzak, M.Sc., U. Laval
Lucie Turgeon, Traductions Ex-Professos, révision linguistique
Antoine St-Gelais, design graphique

Québec Qc, Canada
1^{er} mars 2018

Correspondance

Suzanne Allaire, Ph.D.
PDG
GECA Environnement
4018, avenue des Pyrénées
Québec (Québec) G1P 3L9
Canada
Courriel : gecaenvironnement@gmail.com

Sébastien Lange, Ph.D.
Biopterre
1642, rue de la Ferme
Sainte-Anne-de-la-Pocatière (Québec) G0R 1Z0
Canada
Courriel : sebastien.lange@biopterre.com

© 2017

Comment y référer

Lange SF, Allaire SE, Charles A., Auclair, I., Bajzak CE (2018)
Propriétés physicochimiques de 43 biochars. CRMR-2018-SA1.
Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, Université
Laval et GECA Environnement, Québec, Qc, Canada, 60 p.
DOI : 10.13140/RG.2.2.25450.41924

AVERTISSEMENT

Dans le cadre de ce rapport, il est expressément reconnu que l'équipe de production à l'Université Laval et GECA Environnement ont mesuré eux-mêmes ou ont fait mesurer les propriétés physiques et chimiques des biochars au meilleur de leurs connaissances. Certaines techniques de mesure ont été développées par l'équipe lorsque la méthode n'existait pas pour les biochars, alors que d'autres sont standard et reconnues mondialement. L'objectif de ce rapport est de donner un outil de comparaison des propriétés de différents biochars dont plusieurs proviennent du Québec.

L'ensemble des données empiriques et descriptives sont fournies gratuitement et ne peuvent en aucun cas être vendues.

Les fournisseurs de biochars ont donné leur consentement pour que les propriétés de leur biochar soient publiées. Dans le cas où les biochars ont été achetés (ils l'ont été par Internet), la méthode de pyrolyse n'est pas aussi bien connue et nous ignorons si l'achat est représentatif de l'ensemble de ce qui est vendu sous cette appellation. Leurs propriétés sont quand même publiées à titre informatif.

Considérant que l'équipe de production et GECA Environnement ont fait tous les efforts raisonnables pour assurer l'exactitude des mesures dans ce rapport, et dans le cas où la valeur des propriétés et la description s'avéreraient inexactes, l'équipe de production à l'Université Laval et GECA Environnement ne pourront en aucun cas être tenus responsables pour toutes interprétations, valeurs des propriétés ou conclusions erronées découlant de ces mesures.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	5
2. OBJECTIFS	9
3. INSTANCES QUI ONT FOURNI DU BIOCHAR	11
4. MATÉRIEL ET MÉTHODES	12
4.1 MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES (MOR) ET MÉTHODES DE PYROLYSE	12
4.1.1 BOIS DUR	12
4.1.2 BOIS RÉSINEUX	13
4.1.3 BOIS MOU NON RÉSINEUX	14
4.1.4 PLANTES NON LIGNEUSES	15
4.1.5 FUMIERS	15
4.2 MÉTHODES D'ANALYSE DES BIOCHARS	19
4.2.1 PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES	20
4.2.2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	20
4.2.3 PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	22
4.2.4 PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES	23
5. RÉSULTATS	28
5.1 PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES	28
5.2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	32
5.3 PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	39
5.4 PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES	45
6. CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS	50
7. TRAVAUX RELIÉS AUX BIOCHARS DÉCRITS DANS CE DOCUMENT	51
7.1 THÈSES ET MÉMOIRES	51
7.2 ARTICLES SCIENTIFIQUES AVEC COMITÉ DE LECTURE	52
7.3 ARTICLES DE VULGARISATION	52
7.4 RAPPORTS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES	52
7.5 PRÉSENTATIONS	53
8. RÉFÉRENCES	56

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.

MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES (MOR) ET MÉTHODES DE PYROLYSE DES BIOCHARS 19

TABLEAU 2.

MÉTHODES D'ANALYSE DE LA COMPOSITION GÉNÉRALE DES BIOCHARS 24

TABLEAU 3.

MÉTHODES D'ANALYSE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES 25

TABLEAU 4.

MÉTHODES D'ANALYSE DES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES 26

TABLEAU 5.

MÉTHODES D'ANALYSE DES PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES 27

TABLEAU 6.

COMPARAISON DES ANALYSES DE CE RAPPORT AVEC CELLES DES ANALYSES
SUGGÉRÉES PAR L'IBI (2012) ET L'EBC (2012) 27

TABLEAU 7.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES BIOCHARS 30

TABLEAU 8.

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET RÉELLE;
POROSITÉ ET CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES BIOCHARS 33

TABLEAU 9.

PROPRIÉTÉS DES BIOCHARS RELATIVES À L'EAU 35

TABLEAU 10.

PROPRIÉTÉS DES BIOCHARS RELATIVES À LA GRANULOMÉTRIE ET À LA RÉSISTANCE À L'ABRASION 37

TABLEAU 11.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES BIOCHARS RELATIVES À L'ACIDITÉ 40

TABLEAU 13.

TENEURS EN MACRO ET MICROÉLÉMENTS ÉCHANGEABLES DES BIOCHARS
(RELATIVES AUX PLANTES) 42

TABLEAU 14.

TENEURS EN MACRO ET MICROÉLÉMENTS SOLUBLES DES BIOCHARS
(mg L⁻¹, RELATIVES AU TRANSPORT DE CONTAMINANTS ET AUX PLANTES) 43

TABLEAU 15.

TENEURS TOTALES DES BIOCHARS EN MÉTAUX ET MÉTALLOÏDES
(mg L⁻¹, RELATIVES À L'ENVIRONNEMENT) 44

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.

TENEURS RELATIVES EN DIFFÉRENTS TYPES DE CARBONE DANS LES BIOCHARS
(GRIS : C_{GRAPH} ; BEIGE : C_{INORG} ; VERT: C_{ORG})

31

FIGURE 2.

COURBE GRANULOMÉTRIQUE DES DIFFÉRENTS BIOCHARS

38

FIGURE 3.

PRÉFÉRENCE DU VER DE TERRE POUR LA TERRE NOIRE SEULE (0% BIOCHAR)
OU UN MÉLANGE DE TERRE NOIRE AVEC 10% V/V BIOCHAR

46

FIGURE 4.

PRÉFÉRENCE DU VER DE TERRE POUR LA TERRE NOIRE SEULE (0% BIOCHAR)
OU UN MÉLANGE DE TERRE NOIRE AVEC 50% V/V BIOCHAR

47

FIGURE 5.

TAUX DE GERMINATION DE LA LAITUE DANS LA TERRE À JARDIN AMENDÉE DE 10% V/V DE BIOCHAR

48

FIGURE 6.

TAUX DE GERMINATION DE LA LAITUE DANS LA TERRE À JARDIN AMENDÉE DE 50% V/V DE BIOCHAR

49

1. Introduction

Chaque année, le Québec produit des millions de tonnes de matières organiques résiduelles (MOR) provenant des industries forestière, agricole et alimentaire, des municipalités ainsi que de l'industrie de la construction-démolition. La production de MOR commerciales et urbaines s'élève pour sa part à 5,8 M de tonnes annuellement. Une partie des MOR agricoles est recyclée directement au champ ou par compostage. Par contre, des millions de tonnes ne peuvent pas être réutilisées sur place par risque de recirculation de pathogènes ou parce que le compostage n'est pas toujours facile, entre autres pour les résidus très humides. L'industrie alimentaire produit des MOR souvent trop humides pour le compostage. De plus, cette industrie ne possède généralement pas les terres pour épandre ces résidus et, dans certains cas, elle est obligée d'envoyer ses MOR aux villes pour que celles-ci les gèrent.

Les municipalités, quant à elles, particulièrement les grandes villes, produisent des millions de tonnes de MOR, parfois contaminées et parfois propres. Ce sont, par exemple, des résidus verts comme ceux de la tonte des gazons et les feuilles mortes. Ces matières pourraient être compostées, mais les sacs de plastique dans lesquels ils sont transportés et les impuretés causent différents problèmes. D'autres matières sont générées comme par le nettoyage des rues, des drains, des égouts, par l'émondage et la vidange des fosses septiques. Les sacs de déchets des citoyens, les bacs bruns de recyclage (qui sont rares au Québec), les centres de tri et les écocentres sont d'autres voies de récupération des MOR. Ces centres, une fois le tri terminé, génèrent aussi plusieurs millions de tonnes de résidus. Tout comme l'industrie alimentaire, les municipalités ne possèdent pas nécessairement les surfaces d'épandage suffisantes.

D'une part, environ 60 % de ces 5,8 M de tonnes de MOR urbaines générées annuellement au Québec ne sont pas réutilisées, de cela seulement 21 % de ces MOR putrescibles ont été recyclées en 2012 (Recyc-Québec, 2014). D'autre part, la politique québécoise de gestion des MOR

et le plan d'action du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) visent à réduire l'enfouissement de ces MOR de 100 % d'ici 2020. Cette politique cherche à trouver la meilleure finalité environnementale pour ces résidus. Ceci pousse les municipalités à chercher différentes voies de valorisation pour leurs MOR. En réponse, l'industrie a grandement amélioré son efficacité en fabriquant toute une panoplie de produits à partir de ce qu'on considérait autrefois comme des résidus.

Par ailleurs, la récolte forestière québécoise génère plus de 6,4 M de tonnes de résidus (ex. : sciure, copeaux) (CEF, 2015). Malgré que l'industrie forestière québécoise cherche à utiliser la totalité de la biomasse qui sort de ses forêts, il reste encore beaucoup de résidus comme les branches et les écorces qui peuvent, ensemble, représenter jusqu'à 25 % de l'arbre et qui ne sont pas exploitées. On parle donc de millions de tonnes de résidus produites annuellement au Québec, dont trop peu sont recyclées.

Ces MOR pourraient servir d'énergie, mais le marché québécois de l'énergie est extrêmement compétitif à cause des subventions accordées à l'hydro-électricité, ce qui résulte en de très faibles coûts au kilowatt. On associe aussi le bas coût de l'énergie à l'abondance du gaz naturel. Le compostage offre une autre voie de recyclage, mais ne constitue pas la meilleure option pour plusieurs MOR d'autant plus que le marché peut absorber seulement une partie des volumes potentiels de résidus. De plus, le compostage émet une grande quantité de GES. Si l'infrastructure de compostage est bien installée, les biogaz peuvent être captés et vendus. Toutefois, il faut de grandes installations pour que le captage des biogaz soit économiquement rentable. La majorité de ces MOR doit donc trouver d'autres voies de valorisation.

La méthanisation des MOR peut produire une grande quantité de biogaz pouvant servir d'énergie. Ce procédé produit, par contre, un grand volume de résidus, le digestat, représentant entre 50 et 90 % du volume initial des MOR (Agrinova, 2013). En tant que matière résiduelle

fertilisante (MRF), le digestat est soumis à la réglementation du Ministère du Développement Durable et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC) (Agrinova, 2013). La qualité du digestat, déterminée par son innocuité, sa teneur en nutriments et sa stabilité, fluctue selon le procédé, les traitements, l'entreposage et le type d'intrant (Agrinova, 2013). Sa valorisation est difficile à cause de sa teneur en eau. Sa phase liquide est souvent séparée de sa phase solide. Le solide est ensuite traité par déshydratation, compostage et granulation ou par pyrolyse pour former du biochar.

Outre l'enfouissement direct, le compostage et la méthanisation, l'incinération sert souvent d'alternative au traitement des déchets. Elle élimine un grand volume de déchets, mais coûte cher en plus qu'on ne manufacture aucun autre produit à partir de cette transformation. L'énergie qui sort de l'incinérateur peut servir à chauffer des édifices. Considérant le coût actuel de l'énergie au Québec, cette option n'est pas des plus rentables. De plus, la très grande variation de la demande, en partie due aux saisons, cause un problème dans le contrôle de la distribution de cette énergie. Par ailleurs, on ne valorise pas facilement les cendres.

La pyrolyse est, par conséquent, une alternative intéressante à l'enfouissement, au compostage, à la méthanisation et à l'incinération.

Cette transformation thermochimique n'a pas les limitations des méthodes ci-haut mentionnées en ce qui concerne la réduction des émissions de gaz (réutilisation dans les systèmes de pyrolyse), la stabilisation du matériel transformé, la facilité de manutention, de transport et de distribution et la stérilisation et elle génère en plus des produits à valeur ajoutée. Elle offre un potentiel

Le biochar est un matériel initialement stérile, hautement densifié contenant une grande proportion de carbone qui se présente sous forme de fragments noirs, légers, poreux, secs et faciles à transporter.

d'économie d'échelle et de transformation de MOR tant contaminées que propres.

La pyrolyse (nous incluons ici la torréfaction dans les méthodes de pyrolyse) consiste à carboniser des résidus qui contiennent du carbone en quasi-absence d'oxygène. La pyrolyse/torréfaction se produit entre 275 et 1000°C. La matière organique est ainsi transformée thermochimiquement pour produire des molécules à plus haute densité énergétique comme des huiles, des gaz et un solide (du char) (Sohi et coll., 2010). La proportion d'huile, de gaz et de char varie selon la méthode de pyrolyse et la matière première utilisées. Lorsque la matière première est une biomasse, le résidu solide est appelé biochar. Les huiles peuvent servir à la production d'énergie et de produits transformés comme des biopesticides. Au Québec, les gaz sont souvent récupérés afin de sécher les MOR avant de les pyrolyser. Du fait que les chars peuvent être produits à partir de différentes sources de matières (ex. : pneus, plastiques, MOR variées) et selon divers procédés, la pyrolyse ouvre la porte à toutes sortes de MOR, même celles contenant des sacs de plastique.

Le biochar, aussi appelé « biocharbon végétal » ou « char », se différencie du charbon minéral dit « charbon » du fait qu'il ne s'agit pas de matériel fossile, mais d'un matériel fabriqué à partir de biomasse résiduelle et actuelle (CQVB, 2011).

D'une part, plusieurs instances sont intéressées par le biochar. On pense, entre autres, aux générateurs, transformateurs, gestionnaires de MOR, vendeurs de produits agroenvironnementaux, producteurs agricoles et firmes-conseils, c'est-à-dire tous les membres de la filière des déchets.

L'enjeu de la pyrolyse représente donc des centaines de millions de dollars.

De plus, il y a un engouement pour le biochar en agriculture et en environnement puisqu'on lui confère des propriétés intéressantes pour la croissance végétale, la séquestration du carbone et l'interception de contaminants (Verheijen et coll., 2010, Montanarella, 2013). Les biochars amélioreraient la fertilité, la teneur en eau et la vie microbienne des sols, augmentant du coup la productivité végétale qu'elle soit en sols agricoles, en sols artificiels ou en sols dégradés (Allaire et Lange, 2013). Ces « vertus » semblent toutefois varier selon leurs propriétés, le type de sol, l'espèce végétale et le climat. Pour en faire le meilleur usage, on doit d'une part bien connaître les propriétés de ces biochars en lien avec la matière première et la méthode de pyrolyse ayant servi à les fabriquer.

D'autre part, la jeune filière industrielle du biochar laisse voir qu'il y a un besoin indéniable d'outils pour l'ensemble de ses acteurs et pour son implantation stable au Québec. Afin que les présents obstacles qui freinent ce marché comme la réglementation, les subventions aux autres modes de transformation des MOR et le manque de connaissances sur le biochar ne limitent plus le développement de cette filière, elle doit bien connaître les propriétés des biochars.

En effet, un des outils de base pour le développement de cette filière concerne la caractérisation des biochars...

... c'est-à-dire la connaissance de la variabilité de leurs propriétés en fonction des MOR, de leur conditionnement et de la méthode de pyrolyse. Bien que la pyrolyse existe depuis des millénaires, on ne maîtrise pas encore totalement toutes les connaissances pour fabriquer des biochars ayant les caractéristiques précises désirées pour des applications spécifiques.

Nous présentons dans ce rapport une panoplie de propriétés physiques et chimiques des biochars en lien avec des applications agricoles, horticoles, environnementales, l'entreposage et le transport. Nous ne discutons pas des propriétés énergétiques, ni d'inflammabilité, ni de différentes applications spécifiques, par

exemple comme additifs dans les matériaux de construction.

La plus grande partie du rapport décrit les méthodes d'analyse et les propriétés de 43 biochars, principalement d'origine québécoise, fabriqués de MOR variées à l'aide de différentes technologies de pyrolyse. Dans ce rapport, les méthodes d'analyse des biochars sont décrites et comparées avec celles reconnues par différents organismes. Des méthodes développées par l'équipe ont aussi été utilisées lorsqu'elles n'existaient pas pour le biochar, mais qu'elles revêtaient de l'importance en ce qui a trait au comportement des biochars dans le sol et/ou dans l'environnement. Par ailleurs, ce rapport présente les valeurs des propriétés physiques et chimiques, mais ne discute pas de comparaisons statistiques ni de corrélations entre ces propriétés et n'offre aucune interprétation. Les comparaisons, les interprétations et les discussions seront présentées dans le cadre d'articles scientifiques et d'autres rapports.

2. Objectifs

L'objectif de l'analyse comparative des propriétés physicobiochimiques des biochars était de créer une banque de données de référence afin d'aider les générateurs de MOR, les gestionnaires de ces MOR, les fabricants de pyrolyseurs et de biochar ainsi que les utilisateurs-transformateurs de biochars.

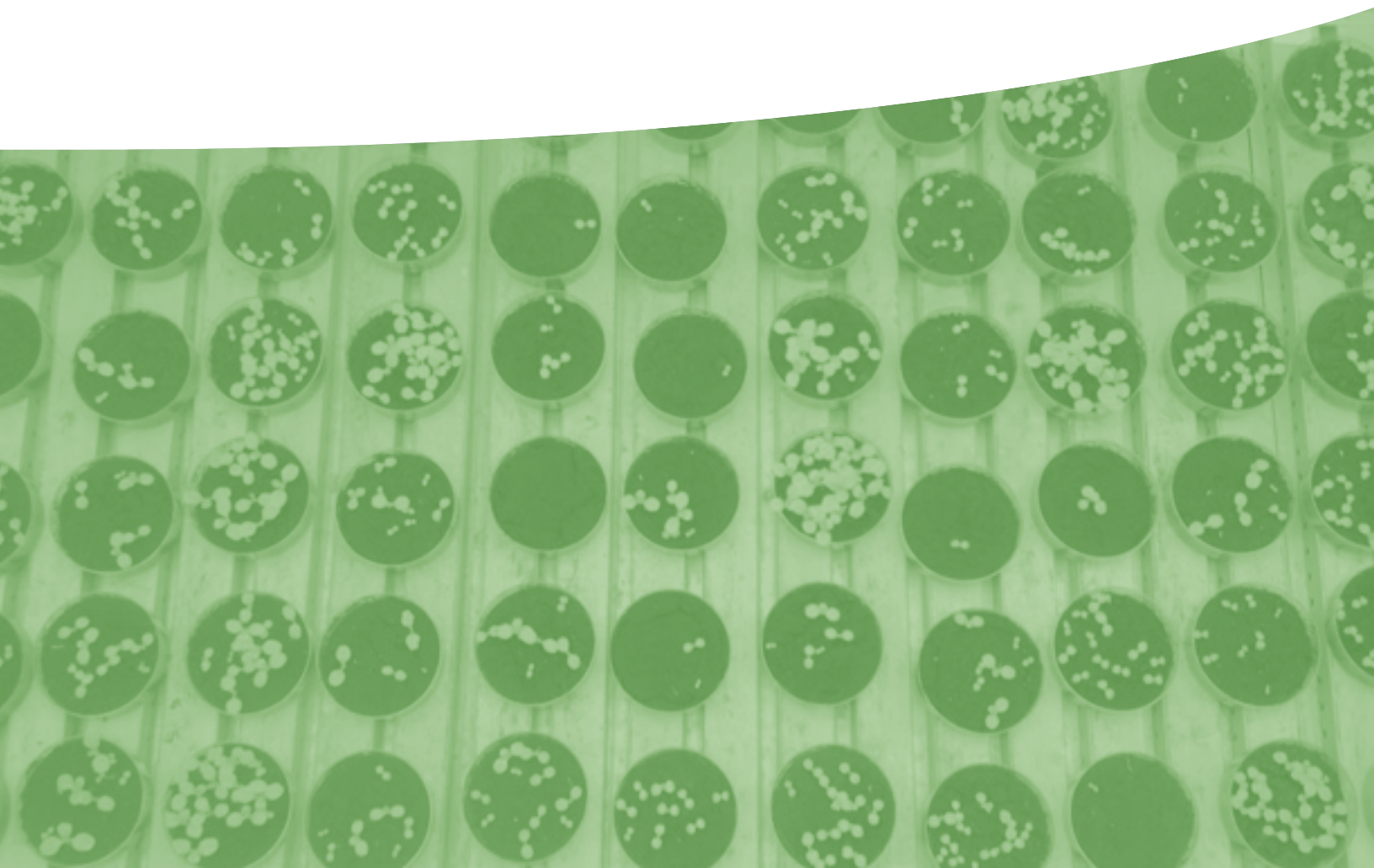
Certaines méthodes d'analyse du biochar utilisées dans la littérature proviennent des analyses standards soit de l'industrie du charbon et de l'énergie, soit de l'industrie des engrais ou des amendements agricoles. Certaines analyses sont influencées par des méthodes légales de déclaration obligatoires pour la protection de l'environnement comme dans le cas des métaux lourds. L'International Biochar Initiative (IBI) a suggéré des méthodes d'analyse des biochars (IBI, 2012), mais la liste est incomplète pour certaines utilisations comme pour la croissance végétale. L'European Biochar Certificate (EBC, 2012) en a aussi suggéré. Elles sont parfois similaires, parfois différentes de celles de l'IBI. De plus, certaines sont parfois classées obligatoires par l'IBI, alors qu'elles ne le sont pas pour l'EBC et vice versa. Le choix des méthodes obligatoires est aussi teinté par l'industrie du charbon et de l'énergie; elles s'avèrent donc souvent inutiles pour des applications agricoles, horticoles et environnementales. L'EBC requiert aussi des déclarations obligatoires de contenus en contaminants (ex. : métaux lourds, HAP) en vue d'applications environnementales, mais avec des normes et des méthodes différentes basées sur les règles européennes en vigueur plutôt que nord-américaines. Au Canada, le Bureau de normalisation du Québec (BNQ) détient ses accréditations du Conseil canadien des normes (CCN) pour l'élaboration de normes et de certifications. Ces accréditations de calibre international garantissent que les procédures et les méthodes du BNQ sont en conformité

avec les règles de l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) et de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC). Les MOR sont aussi assujetties à la législation du gouvernement fédéral canadien via l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA) et du gouvernement provincial québécois que ce soient pour des applications en champs agricoles, pour la production d'aliments ou pour l'application sur des sites dégradés. Pour l'instant, les biochars produits au Québec et au Canada et destinés à être utilisés comme amendements de sols doivent répondre à des normes de certification (métaux lourds et dioxines furanes) émises par l'ACIA, mais celles-ci diffèrent des normes de l'IBI et de l'EBC.

L'équipe s'était donc donné comme sous-objectif de sélectionner les méthodes les plus appropriées pour l'analyse des biochars dans des contextes agricoles, horticoles (effets sur les propriétés des sols et la croissance végétale) et environnementaux tout en prenant

en considération les normes gouvernementales du Canada et du Québec pour la protection de l'environnement. Puisque ce type de produit est apparu sur le marché il y a peu de temps, les méthodes d'analyse ne sont pas encore officialisées ni au Canada ni au Québec. Par ailleurs, pour ces mêmes applications, plusieurs caractéristiques sont importantes, mais les méthodes d'analyse n'existaient pas. Il a fallu en développer ou en adapter certaines qui proviennent d'autres industries.

Ce rapport fournit des données sur une panoplie de biochars utilisés dans différents projets de notre équipe. La classification, les relations MOR/biochars/pyrolyse et les implications environnementales des biochars sont ou seront présentées dans des articles scientifiques et d'autres rapports. Pour simplifier le lien avec les articles scientifiques qui seront produits subséquemment, les noms des biochars ont volontairement été laissés en anglais dans ce rapport.



3. INSTANCES QUI ONT FOURNI DU BIOCHAR



4. Matériel et méthodes

4.1. MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES (MOR) ET MÉTHODES DE PYROLYSE

Ce rapport traite des propriétés physiques, chimiques et biologiques de plusieurs biochars. Cinq grandes classes de MOR ont été utilisées pour catégoriser ces biochars. Ils sont fabriqués à partir de bois dur, de résineux ou de bois mou non résineux, à partir de MOR non ligneuses ou à partir de fumier (Tableau 1).

4.1.1. BOIS DUR



Image de Morguefile par ArielleJay : <https://morguefile.com/p/933661>

Les biochars de bois dur incluent les résidus des charbonneries Maple Leaf et Charbons Basques ainsi que des biochars d'essences exotiques telles que l'eucalyptus et le cocotier (Tableau 1). Les charbonneries brûlent de grandes bûches principalement de bois d'érable (*Acer sp.*) et de merisier (*Betula alleghaniensis*, aussi appelé bouleau jaune) pendant environ 2 à 3 jours (Tableau 3) sans oxygène dans des fours par lots (fours de type Missouri). Le bois qui entre dans le pyrolyseur de Maple Leaf contient entre 30 et 52 % d'humidité, dépendamment de la saison de production et de l'inventaire de bois disponible. Maple Leaf pyrolyse à environ 350°C sous une certaine pression et recycle les gaz. Leurs fours peuvent produire environ 15 tonnes de charbon par jour. Comparativement, Charbons Basques produit à une température légèrement plus élevée pendant plus de 2 jours (Tableau 3). Le sous-produit de fabrication de

ces deux charbonneries sert à fabriquer le biochar. Les résidus sont tamisés après pyrolyse. Les trois biochars de Charbons Basques (BQ-Maple-500-1 ou 2 ou 3) diffèrent principalement par leur granulométrie et la date de fabrication. Les trois biochars de Maple Leaf diffèrent par leur date de fabrication uniquement. Cette technologie produit uniquement des biochars. Le rendement dépend de la vitesse de pyrolyse et du cycle de désorption de l'eau avant l'étape de carbonisation. Les écorces font partie intégrante de ces biochars.

Trois autres biochars (Award-Maple-700, Vietnam et B-Eu-300) ont également été classés parmi les biochars de bois dur (Tableau 3). Le biochar Award-Maple-700 résulte d'une pyrolyse d'écorces d'érable plutôt que de bûches et ce, à 700°C pendant seulement 20 minutes. Le B-Eu-300 résulte d'une pyrolyse d'écorces d'eucalyptus transformées au Cameroun dans un pyrolyseur par lot vertical de petite taille avec recyclage des gaz. Un peu d'air entre dans le système. La température varie autour de 300°C et la pyrolyse dure de 4 à 6 heures. Les écorces ont été prélevées à la surface du sol et étaient donc légèrement contaminées par ce sol. Enfin, le biochar Vietnam résulte d'une pyrolyse rapide à 700°C de fibres (cosse) de noix de coco.

Un total de 9 biochars ont été classés dans la catégorie des bois durs.

4.1.2. BOIS RÉSINEUX



Image de Morquellie par diannehope : <https://morquellie.com/p/957615>

Plusieurs biochars ont été fabriqués à partir de résidus de bois résineux comme des branches, des écorces ou de la sciure de différentes espèces d'épinettes (*Picea sp.*) et de sapins (*Abies sp.*). Ces biochars proviennent de quatre compagnies, soit Biopterre et Pyrobiom avec la technologie d'Abri-Tech, d'Airex Energie Inc. avec la technologie CarbonFX ou de Pyrovac avec leur propre technologie. La technologie d'Abri-Tech fonctionne par lot de fabrication jusqu'à environ 2000 kg à l'heure (pyrobiom). Elle a été conçue pour produire principalement des huiles pyrolytiques dans une proportion d'environ 65 % d'huile pour 20 % de biochar. Le biochar étant un sous-produit et non le but final, il peut contenir des volatils. La biomasse est thermiquement transformée au contact de billes d'acier chauffées pour augmenter la gazéification de la matière. La biomasse doit avoir une granulométrie très fine (entre 2 et 20 mm) pour être pyrolysée pendant seulement quelques minutes à une température variant entre 400 et 550°C, selon les besoins et ce, sans oxygène sous une pression d'environ 1 cm. Il n'y a donc pas besoin de tamisage après pyrolyse. La différence entre les biochars de résineux provenant de la technologie Abri-Tech réside dans la température de pyrolyse soit 400°C pour BP-Res-400 ou 500°C pour BP-Res-500 et Pyrobiom et la matière première.

Airex Énergie, qui a développé la technologie CarbonFX, est un essaimage de l'entreprise Airex Industries spécialisée en dépoussiérage



industriel. Son pyrolyseur consiste en un réacteur à lit cyclonique développé pour des particules fines comme la sciure de bois. La biomasse est pyrolysée entre 420 et 460°C en quelques secondes, à pression atmosphérique avec une fine entrée d'air et un transfert de chaleur par forte turbulence. Il peut produire environ 250 kg de biochar à l'heure en continu et ne produit que du biochar. Dans ce rapport, la différence entre les biochars d'Airex réside surtout dans la date de fabrication (Airex_2_AGRICAN, Airex_201_AGRICAN, Airex_aout_2016_AAC et Airex_mai_2016_AAC), la température de fabrication (Airex-Res-427 ou 454°C) et le type de MOR soit du bois vierge ou de démolition (Airex-RW-315 ou 426). Dans le cas de Pyrovac, la matière première (bois mou résineux) doit contenir entre 10 et 15 % d'humidité massique. Il peut accueillir une panoplie de produits ayant une granulométrie comprise entre 0,4 et 40 mm et qui peut être hétérogène. Le temps de pyrolyse est de 15 minutes sous une pression de 20 kPa à une température de 475 à 500°C partiellement sous vide. Le pyrolyseur peut produire 3000 kg de biochar à l'heure. La différence entre les deux biochars de Pyrovac produits à 500°C repose sur l'entreposage. Le premier (Pyr-Res-475) a été entreposé pendant environ 2 ans dans un entrepôt et en contenant étanche. Le deuxième (Pyr-Res-475-vieilli) a été entreposé à l'extérieur dans des super sacs (polypropylène) non étanches et a été tamisé à 2 mm. Le dernier, Pyrovac_BR_UF_475 a été produit 2 ans plus tard à une température de 475°C à partir de sciure de bois mou.

De plus, il était important de tester des résidus de bois de recyclage qui forment de grands volumes peu exploités. Dans ce rapport, nous avons testé cinq biochars de bois de démolition composés d'environ 90 % d'épinettes et 10 % de bois durs variés (I-RW-300-24 et 48 et Airex-RW-315 ou 426). Il faut noter que les résidus de l'industrie forestière forment un très grand volume et sont entreposés de façon relativement homogène dépendamment des espèces. Nous pouvons donc obtenir des biochars d'espèces de bois déterminées. Par contre, les résidus de

l'industrie de la construction-démolition offrent surtout des mélanges d'espèces de bois de différentes utilisations, donc moins homogènes. Étant donné que les charpentes et les murs des constructions québécoises sont principalement fabriqués d'épinettes, une grande partie du bois de démolition du Québec contient cette espèce. La technologie utilisée pour les trois biochars I-RW consiste en un four par lot où un peu d'air entre. Étant faits à partir de vieux bois de démolition, leur teneur en eau massique initiale était inférieure à 10 %. Ce bois a été broyé et tamisé pour obtenir une granulométrie < 2 mm. Une pression atmosphérique est maintenue dans le four. La biomasse est restée dans le four durant 24 ou 48 heures à 300 °C. Ni les gaz, ni les huiles n'ont été recyclés. Deux autres biochars de bois recyclé ont aussi été obtenus à l'aide de la technologie Airex soit Airex-RW-315 ou 426 à deux températures différentes.

Finalement, nous nous sommes procuré un biochar commercialisé par la compagnie AirTerra basée en Alberta, Canada. Ce biochar est fait de pin gris pyrolysé à 450°C. Un total de 18 biochars ont donc été classés dans la catégorie des bois mous résineux.

4.1.3. BOIS MOU NON RÉSINEUX



Image de Morguefile par KarolynAnn :
<https://morguefile.com/p/935536>

D'autres biochars sont aussi fabriqués à partir de bois mou non résineux (Tableau 3), c'est-à-dire des feuillus comme le bouleau blanc (*Betula papyrifera*) et le saule (*Salix sp.*) en utilisant l'arbre en entier, les branches ou les écorces

(BP-Birch-x, BP-Willow-x). Biopterre en a produit plusieurs à l'aide de la technologie Abri-Tech. La principale différence entre ces biochars est la température de fabrication soit 400, 450 ou 500°C. De plus, nous nous sommes procuré un biochar commercial (Coolterra) de la compagnie Cool Planet basée au Colorado, É.-U. Il semble avoir été fait en partie de bois mou et/ou de fibre de coco pyrolysés à 475°C.

Un total de 8 biochars ont été classés dans la catégorie des bois mous non résineux.

4.1.4. PLANTES NON LIGNEUSES



Image de Morquellie par arcturusangel : <https://morquellie.com/p/909647>

Le phragmite (*Phragmites australis* sp.) est une plante très envahissante et il cause beaucoup de problèmes au Québec. Pour le contrôler, on a tendance à le faucher. Les résidus de fauche de ces plantes ont été utilisés pour tester leur potentiel pour la fabrication de biochar. La fauche a été effectuée au printemps sur les tiges de l'année précédente, donc qui avaient séché pendant l'hiver. Ces résidus ont été déchiquetés à 8 mm, mais non séchés, puis pyrolysés à l'aide de la technologie Abri-Tech à 400 ou 500°C pour former deux biochars (BP-Phragmite-400 ou 500).

De plus, certains résidus de productions maraîchères ne peuvent pas facilement être recyclés par compostage ou incorporés directement au champ. Les pommes de terre déclassées (patates), les feuilles de choux et de poireaux sont trop humides pour être facilement compostées et leur recyclage dans les champs

peut causer des problèmes de prolifération de maladies. Nous avons donc choisi de les pyrolyser pour connaître leur potentiel en tant que biochars (I-patate-300-24, I-cabbage-300-48, I-leek-300-48). Les pommes de terre ont été coupées manuellement en juliennes, alors que les résidus de choux et de poireaux ont été coupés à l'aide d'une fourragère. Nous avons complété leur pyrolyse dans des fours par lot où un peu d'air est entré. Une pression atmosphérique est maintenue dans le four. La biomasse est restée dans le four durant 24 ou 48 heures à 300 °C. Ni les gaz, ni les huiles n'ont été recyclés. Les biochars de pommes de terre ont été pyrolysés pendant 24 heures, car ils ne pouvaient pas supporter 48 heures sans se consumer.

Des rafles de maïs (B-Corn-300) ont aussi été transformées au Cameroun dans un pyrolyseur par lot vertical de petite taille avec cheminée et recyclage des gaz. Un peu d'air entre dans le système. La température varie autour de 300°C et la pyrolyse durait de 4 à 6 heures.

Un total de 6 biochars ont donc été classés dans la catégorie des plantes non ligneuses.

4.1.5. FUMIERS



Image de Morquellie par Seemann : <https://morquellie.com/p/621570>

Cette catégorie inclut deux biochars fabriqués de fumier de poulet et de fumier de porc.

La production porcine québécoise, avec ses 7,5 millions de porcs annuellement (Gariépy et Lacroix, 2013), génère tellement de lisier que le gouvernement québécois

l'a plafonnée afin d'éviter d'aggraver les problèmes environnementaux et sociaux qui y sont rattachés. L'industrie et les instances de recherche sur la gestion et la transformation du lisier de porc travaillent à valoriser ce lisier depuis bien des années. Ceci inclut quelques petits essais très récents de transformation en biochar. Le lisier provient d'une ferme d'élevage porcin de type croissance-finition où les fractions liquide et solide ont été séparées sous les lattes du plancher de la porcherie. Par la suite, la fraction solide a été séchée à l'aide du procédé SHOCMD (les détails du procédé peuvent être consultés dans Léveillé et coll., 2011) (<http://www.irda.qc.ca/fr/publications/le-procede-shoc-une-solution-novatrice-pour-le-traitement-et-la-valorisation-des-residus-organiques/>). La fraction solide sèche du

lisier de porc a été transformée en biochar (IRDA-manure-500) au moyen d'une pyrolyse lente avec une alimentation par lot à 500°C pendant 1,5 heure. Un débit de 2 L min⁻¹ d'azote a été établi dans le réacteur à pression atmosphérique pour maintenir une atmosphère inerte et pour favoriser l'évacuation des gaz du réacteur. Dans ce pyrolyseur, la matière doit entrer avec un taux d'humidité inférieur à 85 %.

L'autre biochar a été fabriqué à partir de fumier de poulet (Chicken Manure) à l'aide de la technologie Abri-Tech à une température d'environ 500°C. Il est donc composé en partie de fientes et de paille.



TABLEAU 1. MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES (MOR) ET MÉTHODES DE PYROLYSE DES BIOCHARS

NOM	MATIÈRE ORGANIQUE	CONDITIONNEMENT	MÉTHODE DE PYROLYSE				
			TYPE¹	TEMP (°C)	DURÉE (h)	PRESSION (kPa)	TECHNOLOGIE
BOIS DURS							
B-Eu-300	Écorces d'eucalyptus	Broyé après pyrolyse	L	300	6	0	Four traditionnel amélioré
Maple-101-AAC	Résidus de charbonnerie, érable et merisier	Tamisé à ≤ 1,9 mm après pyrolyse	L	328	40	oui	Four de type Missouri
Mapple-102-AAC	Résidus de charbonnerie, érable et merisier	+ matière liante	L	328	40	oui	Four de type Missouri
Leaf-Maple-350	Résidus de charbonnerie, érable et merisier	Tamisé après pyrolyse	L	350	40	oui	Four de type Missouri
Vietnam	Fibre de coco	Broyé+tamisé après pyrolyse	L	475	NA	NA	Four de type Missouri
BQ-Maple-500-1	Résidus de charbonnerie	Tamisé à moyen-grossier après pyrolyse	L	500	48-72	oui	Type Missouri
BQ-Maple-500-2	Résidus de charbonnerie	Fines obtenues après tamisage	L	500	48-72	oui	Type Missouri
BQ-Maple-500-3	Résidus de charbonnerie	Tamisé à moyen-grossier après pyrolyse	L	500	48-72	oui	Type Missouri
Award-Maple-700	Écorce d'érable	Aucune	R	700±100	0,4	oui	Award Rubber
BOIS RÉSINEUX							
I-RW-300-24-4	Bois démolition 90% épinettes, 10% bois dur	Broyé et tamisé	L	300	24	0	Four expéri.
I-RW-300-24-32	Bois démolition 90% épinettes, 10% bois dur	Broyé et tamisé	L	300	24	0	Four expéri.
I-RW-300-48	Bois démolition 90% épinettes, 10% bois dur	Broyé et tamisé	L	300	48	0	Four expéri.
AirTerra	Pin gris		L	450	NA	NA	N/A
Airex-RW-315	Bois de démolition recyclé	Tamisé à < 6,4 mm avant pyrolyse	R	315	0,01	0	Airex
BP-Res-400	Branches:50% sapin/50% épinette	Broyé + séché avant pyrolyse	R	400	0,08	0,1	Abri-Tech
Airex-RW-426	Bois de démolition recyclé	Tamisé à < 6,4 mm avant pyrolyse	R	426	0,01	0	Airex
Airex-Res-427	Sciures de résineux	Broyé et tamisé à ≤ 2 mm avant pyrolyse	R	427	0,01	0	Airex
Airex-2-AAC	Sciures de résineux	Tamisé à < 6,4 mm avant pyrolyse	R	454	0,01	0	Airex
Airex-201-AAC	Sciures de résineux	Tamisé à < 6,4 mm avant pyrolyse	R	454	0,01	0	Airex

¹ L: Lent R: Rapide



4.2. MÉTHODES D'ANALYSE DES BIOCHARS

L'ensemble des méthodes d'analyse des biochars, qu'elles soient référées par l'IBI ou l'EBC, est teinté par l'industrie énergétique à cause de la ressemblance avec le charbon. Certaines sont en lien avec les exigences établies par les gouvernements pour la protection de l'environnement. Les méthodes sont passablement moins influencées par l'industrie forestière quoique cette industrie soit à l'origine des matières les plus fréquemment utilisées pour fabriquer les biochars. Par contre, ces méthodes ne sont que très peu influencées par l'agriculture, même si les biochars sont souvent considérés comme des amendements aux sols et intrants dans les terreaux, excepté pour leurs teneurs en éléments nutritifs. Nous associons ces influences principalement à l'historique du biochar.

Notre équipe a tenu à respecter certaines exigences soit celles de l'IBI, de l'EBC ainsi que celles des gouvernements québécois et canadien pour les méthodes d'analyse (1) pour répondre aux normes actuellement en vigueur (2) afin de permettre une comparaison ultérieure avec d'autres études et d'aider notre industrie à situer ses produits internationalement (3). Nous avons utilisé le plus souvent possible les méthodes ASTM ou des méthodes québécoises certifiées. Comme l'équipe étudie les biochars pour des applications agricoles, forestières ou environnementales locales, nous nous sommes peu attardés aux propriétés relatives à l'énergie (BTU, point d'ignition, inflammabilité, etc.).

Nous avons, par contre, étudié des propriétés non exigées par les standards, mais qui aident à comprendre et à prédire le comportement des biochars dans les milieux poreux comme les sols, les terreaux et les résidus miniers.

Nous avons divisé les propriétés des biochars en différentes classes : les propriétés de composition générale (Tableau 2), les propriétés physiques (Tableau 3), les propriétés chimiques relatives à la croissance des plantes et à l'environnement (Tableau 4) et les propriétés biologiques indicatrices de risques environnementaux (Tableau 5).

Les paramètres généraux correspondent à des mesures de l'industrie énergétique. Celles-ci n'influencent que peu le comportement des biochars dans le sol et dans les terreaux, et leur utilité est minime lorsqu'il s'agit d'identifier les risques pour l'environnement. Par contre, le type de carbone aide à établir le potentiel de séquestration à long terme, le carbone graphitique étant probablement le plus stable.

Les propriétés physiques (Tableau 5) comme la masse volumique apparente tapée, la surface spécifique de même que les caractéristiques relatives à l'eau et à la granulométrie influencent beaucoup le comportement des biochars dans les milieux poreux, en entreposage et lors du transport.

De nombreuses propriétés chimiques sont prises en considération soit parce qu'elles influencent l'efficacité des biochars pour la croissance des plantes (éléments solubles, échangeables, éléments nutritifs) et les propriétés d'échanges des milieux poreux (pH), soit parce que les normes environnementales requièrent l'identification de leurs contenus (teneur en métaux lourds). Les teneurs en dioxines et en furanes ne sont pas présentées dans ce rapport à cause des coûts très élevés liés à ces analyses (~900 \$ CA/éch.).

On a aussi mesuré deux propriétés indicatrices des biochars sur la biologie comme la préférence des vers de terre pour les sols contenant ou non du biochar et la germination de la laitue (Tableau 7), deux espèces sensibles à la pollution et aux autres facteurs environnementaux.

4.2.1. PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES

Les teneurs en cendres et en C, H, N, S correspondent à la teneur totale de ces éléments (Tableau 2). La teneur en carbone total (C_{tot}), organique (C_{org}), inorganique (C_{inorg}) et graphitique (C_{graph}) aide à identifier les formes de carbone dans le biochar. Les différents types de carbone donnent une idée sur leur transformation et sur leur mode de transformation potentielle dans le sol. Le C_{inorg} correspond principalement au CaCO₃. Nous nous attendons à ce que le C_{graph} soit le plus stable dans le sol. Le ratio molaire de H/C_{org} et O/C est simplement calculé à partir des mesures précédentes. Ils sont présentés parce qu'ils sont considérés obligatoires par différentes instances, mais découlent surtout de l'industrie énergétique.

4.2.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

La surface spécifique est souvent demandée, mais n'est pas donnée dans ce rapport. Notre équipe, ainsi que plusieurs autres équipes collaboratrices, ont noté que la méthode standard BET ne fonctionne pas correctement avec beaucoup de biochars tout comme la méthode à l'iode, malgré qu'on voit souvent des

valeurs de surface spécifique dans la littérature. Nous avons aussi observé que les méthodes ne fonctionnent pas, en particulier pour les biochars très statiques, ceux très fins et certains qui contiennent un peu plus d'huile. Nous nous sommes aussi rendu compte que la surface spécifique augmente avec la durée d'immersion dans l'eau. Ces méthodes doivent donc être adaptées au biochar, mais les adaptations ne sont pas encore garanties pour leur utilisation dans un tel rapport.

Propriétés hydriques

Ce rapport discute de propriétés physiques des biochars relatives à l'eau (Tableau 5). L'EBC et l'IBI requièrent la déclaration de la teneur en eau gravimétrique (θ_g). L'EBC différencie entre θ_g facile à extraire et hygroscopique fortement liée aux particules, alors que l'IBI exige seulement la première. Nous mesurons seulement l'eau facilement extractible dans ce rapport, par simplicité. En fait, θ_g n'affecte pas vraiment le comportement du biochar dans les milieux poreux. S'il est exigé, c'est plutôt pour indiquer à l'acheteur s'il paie pour de l'eau ou pour son pouvoir calorifique. θ_g a, par contre, un impact dans certains usages comme pour l'activation en charbon activé. Nous avons mesuré θ_g entre 70 et 105 °C pendant 24 h, une méthode adaptée de l'IBI et de l'analyse des sols. Nous avons donc retiré un peu plus d'eau qu'avec la méthode de l'IBI, mais moins qu'avec la méthode de l'EBC.

Un autre paramètre suggéré, mais non requis par les deux organismes internationaux concerne la rétention en eau. Cette rétention met en évidence le comportement du biochar dans les milieux poreux ou en entreposage en cas de problème d'eau. La méthode suggérée par l'EBC donne seulement une idée de la capacité ou de l'incapacité du biochar de sorber de l'eau lorsque complètement submergé. Nous n'avons pas utilisé cette méthode. Comparativement, notre méthode indique la quantité d'eau atmosphérique (absorption de l'humidité de l'air) ou du milieu poreux (remontée capillaire) que peut extraire le biochar. Pour l'absorption de l'humidité de l'air, nous avons soumis le biochar à une humidité

relative (HR) de 80 % et mesuré la masse d'eau, initialement sous forme vapeur, sorbée en 72 h. Pour la remontée capillaire, nous avons soumis le biochar à une force de rétention en eau, simulant un sol très mouillé (potentiel matriciel (tension) près de zéro) versus un sol un peu plus sec, mais quand même très humide (potentiel matriciel plus négatif). La vitesse d'augmentation de son poids en eau sous différentes tensions se produit par remontée capillaire en sorbant l'eau sous forme liquide. Nous avons sélectionné ces propriétés parce qu'elles représentent le mieux le comportement des biochars face à l'eau dans son milieu. Il est important de les mesurer puisqu'on donne souvent au biochar la vertu d'aider les sols à retenir l'eau, sans jamais mesurer sa véritable capacité à le faire.

Propriétés relatives à la taille des particules et à la conductivité électrique

Ces propriétés physiques sont très importantes pour le comportement des biochars dans les sols et les milieux poreux. La masse volumique apparente (ρ_a) inclut les vides intra et interparticulaires (Tableau 3). Elle influence le stockage et le transport. Elle indique le potentiel de changement de densité d'un sol ou d'un terreau lorsque le biochar y est ajouté. Cette donnée est requise par l'EBC, mais pas par l'IBI. Comparativement, la masse volumique réelle (ρ_s) représente le rapport masse / volume particulaire excluant le vide interparticulaire. La ρ_s indique le comportement d'une particule dans un autre milieu, par exemple la flottabilité du biochar lorsque dans l'eau. La porosité totale Θ est calculée selon $\Theta = 1 - \rho_a / \rho_s$. La conductivité électrique (CE) indique la capacité à transporter l'électricité. L'IBI et l'EBC l'exigent, mais reconnaissent des méthodes différentes. La CE dépend de la quantité de sels contenue dans le biochar. Nous pouvons donc évaluer la salinité des biochars en mesurant la CE. La capacité des plantes à extraire l'eau de leur environnement est non seulement dépendante du potentiel matriciel, mais aussi du potentiel osmotique créé par la salinité.

Une analyse granulométrique par tamisage a été complétée en procédant à deux tamisages successifs pour chacun des échantillons : (1) Un premier tamisage dans une colonne de 8 tamis : 8, 4, 2, 1, 0,50, 0,25 et 0,125 mm; (2) un deuxième tamisage dans un tamiseur à ultrasons pour séparer les particules de taille inférieure à 0,250 mm. La colonne de tamis pour ce deuxième tamisage comprenait 5 tamis : 0,250, 0,106, 0,053, 0,025 mm. L'IBI requiert une analyse granulométrique, mais pas aussi complète, alors que l'EBC ne l'exige pas. À partir de ces tamisages, plusieurs paramètres ont été calculés. Le diamètre moyen pondéré (DMP) indique la taille moyenne des particules. Cette information est importante pour connaître le type de machinerie nécessaire pour appliquer le biochar dans le milieu et prédire son comportement une fois appliqué. Le DMP influence par exemple, la rétention de l'eau et le mélange potentiel avec d'autres ingrédients comme des engrais ou en mélange dans une litière. À partir de la courbe granulométrique, nous avons calculé différents paramètres comme le pourcentage de particules plus fines qu'un certain diamètre, par exemple D10 pour indiquer le pourcentage de particules plus fines que 10 % des particules. Ces paramètres servent à calculer l'homogénéité de la taille des particules, c'est-à-dire l'indice d'uniformité (IU). Un indice d'uniformité (D60/D10) de faible valeur signifie que les particules ont une taille uniforme. Une distribution très hétérogène de particules peu offrir certains avantages par rapport à des particules de tailles très homogènes souvent obtenues par tamisage, puisque chaque taille de particules peut jouer un rôle différent dans la rétention de l'eau, la protection des sols contre l'érosion et la décompaction des sols. Dans certains cas, on peut vouloir une granulométrie très homogène lorsqu'un comportement précis est recherché. L'IU est important pour les mélanges d'amendements ou pour fabriquer un terreau, car il indique si le biochar sera ou non susceptible de se séparer des autres composantes du mélange lors du transport, de la manutention et durant la croissance des plantes.

Nous avons ensuite soumis certains biochars à une abrasion à l'aide de billes d'acier. Des mesures de résistance à l'abrasion (RA) mettent en évidence la résistance au bris qu'offre un composé par le déplacement de ses particules soumis à l'action de différentes forces. Ce paramètre aide à connaître les effets qu'auront sur les biochars le transport, le stockage ainsi que les manipulations. La granulométrie après l'abrasion a été mesurée selon la méthode décrite précédemment. La variation de la taille moyenne des particules (ΔDMP), de l'indice d'uniformité (ΔIU) et de la taille spécifique des particules (Dx) indique le pourcentage de changement. Ces informations ne sont requises par aucune norme, mais ne sont pas dispendieuses à produire et répondent à des besoins de connaissances pour l'ensachage, le transport et la manutention.

4.2.3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Propriétés relatives à l'acidité

Nous discutons de plusieurs propriétés chimiques relatives à la dynamique de l'hydrogène, soit le pH et le pouvoir tampon (PT) (Tableau 4). L'IBI et l'EBC exigent le pH, mais pas avec la même méthode. Ces deux méthodes donnent des résultats quelque peu différents, mais considérant la grande variation de pH entre les biochars, elles ne seront pas tellement différentes pour une étude comparative, comme c'est le cas de ce rapport. Nous avons utilisé une méthode similaire à l'IBI dans ce rapport soit une mesure dans l'eau. Le PT n'est exigé par aucun des deux organismes, mais il donne une bonne idée du comportement qu'aura le biochar dans un milieu ayant un pH différent. Il est nécessaire en agriculture. Les biochars, souvent basiques, peuvent être incorporés dans des milieux beaucoup plus acides comme de la tourbe, des podzols ou des résidus miniers. Nous avons mesuré le pouvoir tampon jusqu'à l'atteinte d'un pH 7 (lorsque possible) et d'un pH 4.

Éléments échangeables et solubles

La teneur en éléments échangeables (Tableau 6) sert à connaître leur disponibilité aux plantes ainsi que l'équilibre nutritionnel des plantes. Habituellement, nous nous servons de la somme des éléments échangeables N, P, K, Ca et Mg pour calculer la capacité d'échange cationique (CEC) des sols. Considérant que les sols sont soumis aux pluies années après années, nous représentons leur capacité à retenir les éléments avec leur contenu restant après tout ce temps. Cette propriété se nomme CEC. Par contre, les biochars n'ont pas été soumis à du lessivage comme c'est le cas pour des sols. Leur contenu en éléments échangeables, au sortir de l'usine, indique seulement leur contenu total sans égard au fait qu'ils peuvent ou non être échangés. Dans ce rapport, nous parlons donc de la somme des éléments échangeables plutôt que de CEC.

La teneur en éléments solubles sert non seulement à connaître la disponibilité en nutriments pour les plantes lorsque l'eau est présente, mais aussi à déterminer les risques de circulation et de contamination dans l'environnement. Les éléments solubles (K, Ca, Mg, Na, Mn, Fe, Al, Cu, Zn) ont été extraits à l'eau.

Propriétés relatives à la protection de l'environnement

L'IBI et l'EBC exigent la déclaration de la teneur en métaux lourds (Tableaux 4 et 6) en vue de la protection de l'environnement. Ces valeurs servent à les classer pour des approbations ou des exclusions d'utilisation. La liste des métaux, les méthodes d'analyse et les maxima acceptés varient entre les organisations. Les maxima acceptés par l'EBC et l'IBI correspondent généralement aux normes gouvernementales européennes ou américaines. Nous avons mesuré la plupart des métaux (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se et Zn) en plus d'analyser des métalloïdes (Fe et Al) à l'aide des mêmes méthodes que l'IBI. Étant donné le coût, seules quelques valeurs de HAP ont été mesurées.

Puisqu'elles rencontraient les normes et vu leur faible nombre, elles ne sont pas discutées ni fournies dans ce rapport.

4.2.4. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES

Outre les propriétés générales qui s'ajoutent aux propriétés physiques et chimiques, une dernière classe de propriétés correspond à des tests suggérés par l'IBI décrits comme étant relatifs à la toxicité biologique (Tableau 5). Nous parlons de tests d'évitement des vers de terre et de la germination de la laitue dans un mélange de terre et de biochar. Pour ces tests, ni la teneur en biochar dans les mélanges de terre, ni l'espèce de vers de terre, ni la variété de laitue ne sont dictées par l'IBI. Elles sont simplement suggérées.

Nous avons réalisé le test d'évitement avec des vers de terres *Eisenia feotida sp.*, une espèce spécialement utilisée pour le vermicompost. Ceux-ci sont déposés au-dessus de la partie médiane de contenants séparés verticalement en deux parties égales. D'un côté, nous avons mis de la terre à jardin, de l'autre un mélange de terre et de biochar à raison de 10 ou 50 % V/V de biochar. La distribution des vers de terre après 48 h indique la préférence des vers pour la terre ou pour le mélange terre : biochar. Leur préférence dépend de plusieurs facteurs comme

la toxicité, le pH, l'abrasion sur leur peau, etc.

Des essais de germination de laitue (*Lactuca sativa var. Buttercrunch*) tel que suggéré par l'IBI ont aussi été effectués. Des graines ont été semées dans des boîtes de Pétri avec les deux mêmes concentrations de biochars que celles utilisées pour le test d'évitement des vers de terre, c'est-à-dire 10 et 50 % V/V dans la même terre pendant 10 j. Le taux de germination de 20 semences a été compté à différents moments et rapporté en pourcentage du nombre de graines ensemencées. Cette information indique si le milieu est propice à la germination des plantes, la laitue étant une plante sensible à son milieu à cause du pH, du déséquilibre nutritionnel ou de contaminants. Les propriétés physiques du milieu comme le taux d'humidité, la densité et le mouvement des gaz ne sont pas testés dans ce type d'essai. Dans ce rapport, la comparaison de la germination entre les biochars relève donc plutôt de leurs propriétés chimiques que de leurs propriétés physiques.

Les méthodes sélectionnées sont celles que nous croyons les plus appropriées pour des utilisations agricoles et environnementales, en plus de répondre aux différentes exigences des gouvernements québécois et canadiens et de certaines instances internationales.

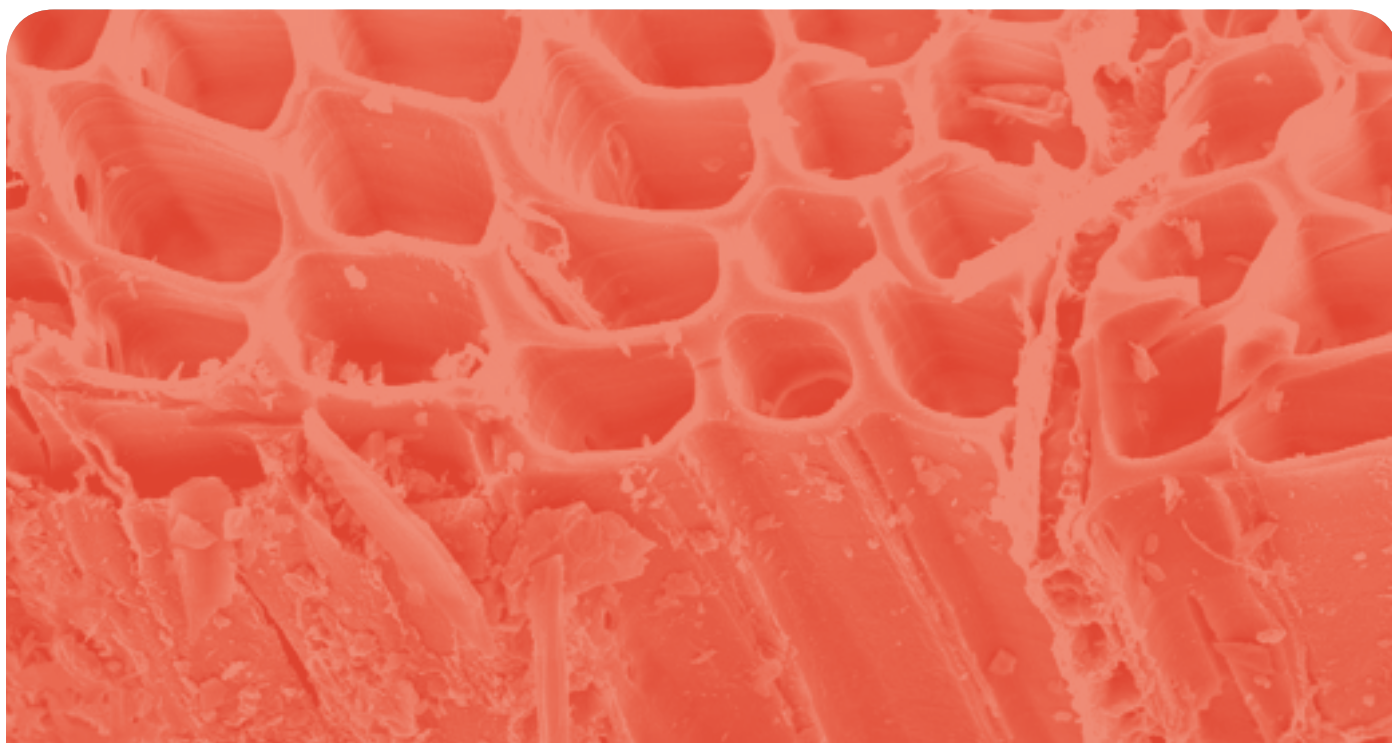


TABLEAU 2. MÉTHODES ET ANALYSE DE LA COMPOSITION GÉNÉRALE DES BIOCHARS

SYMB.	NOM	UNITÉS	MÉTHODE	APPAREIL	RÉFÉRENCE
GÉNÉRALES					
Cendres	Teneur en cendres	%	Perte au feu	Four à moufle	Adapté de ASTM-D1762-84 et de CAEAQ MA. 1010-PAF 1.0
Énergie	Pouvoir calorifique supérieur	MJ kg ⁻¹	Combustion	Isoperibol oradiabatic bomb calorimeter	ASTM D5865
H	Teneur en hydrogène	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et al. (2014) et Brewer (2012)
O	Teneur en oxygène	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et al. (2014) et Brewer (2012)
N	Teneur en azote	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et al. (2014) et Brewer (2012)
S	Teneur en soufre	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et al. (2014) et Brewer (2012)
RELIÉES AU CARBONE					
C _{tot}	Teneur en carbone total	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et al. (2014) et Brewer (2012), LECO (2009)
C _{inorg}	Teneur en carbone inorganique	%	Détermination rapide du carbonate dans les sols	Différentes méthodes et analyses	ASTM D4373-14 et CEAEQ (2009, 2013) et ISO 9686 (2006)
C _{org}	Teneur en carbone organique	%	$C_{org} = C_{tot} - C_{inorg}$	Par différence	ASTM D4373-14 et CEAEQ (2009, 2013) et ISO 9686 (2006)
C _{graph}	Teneur en carbone graphitique	%	Combustion	Spectroscopie à infrarouge	ASTM D4373-14 et CEAEQ (2009, 2013) et ISO 9686 (2006)
H/C _{org}	Ratio molaire H/C	—	$H/C_{org} = H/C_{org}$	—	—
O/C	Ratio molaire O/C	—	$O/C = O/C$	—	—
% = Pourcentage massique soit g g ⁻¹ x 100.					

TABLEAU 3. MÉTHODES D'ANALYSE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

SYMB.	NOM	UNITÉS	MÉTHODE	APPAREIL	RÉFÉRENCE
DENSITÉ ET POROSITÉ					
ρ_b	Masse volumique apparente	g cm^{-3}	Densité tapée après 3 chutes de 0,15 m	Cylindre	Adapté de ISO 5311 :1992
ρ_s	Masse volumique réelle	g cm^{-3}	Pycnomètre au gaz	AccuPyc 1330 Micromeritics	ASTM B923-10
Θ	Porosité totale	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	$\Theta = 1 - \rho_b / \rho_s$	—	Flint et Flint (2002)
PROPRIÉTÉS HYDRIQUES					
CE	Conductivité électrique	dS m^{-1}	À l'eau	Radiomètre, Copenhague	Rajkovich et al. (2011), TMECC 4.11 (2001), IBI (2012)
RH	Sorption de l'humidité de l'air	%	À 80% d'humidité pendant 72 h	Chambre à environnement contrôlé	Allaire et al. (2004a)
θ_g	Teneur en eau massique	%	Séchage au four à 105°C et 70°C	Four à moufle	Adapté de ASTM D1762-84
θ_m et θ_b	Paramètres de régression du taux de sorption d'eau par remontée capillaire soumis à une tension x	$\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$	Tension à -0,05, -0,25, -0,50, -0,75, -1,00, et -1,40 m	Table de tension, régression non linéaire	Adapté de Allaire et Parent (2004b)
θ_x	Sorption totale d'eau sous différentes tensions x	%	Tension à -0.05, -0,25, -0,50, -0,75, -1,00, et -1,40 m	Table de tension, régression non linéaire	Adapté de Allaire et Parent (2004b)
GRANULOMÉTRIE					
MWD	Diamètre moyen pondéré	μm	Granulométrie avec tamiseur standard et à ultrasons	Tamiseur standard RX-29, Ro-Tap, W.S. Tyler et tamiseur ultrason	Adapté de Gee et Or (2002) pour le tamissage, Nimmo et Perkins (2002) pour MWD
Dx	Diamètre de x% des particules les plus fines	μm	Courbe granulométrique	—	Adapté de Gee et Or (2002) pour le tamissage, Nimmo et Perkins (2002) pour MWD, et adapté de ASTM D2862-10 pour MWD
IU	Index d'uniformité	—	D60/D10	—	Allaire et Parent (2003, 2004a), CFI (2001)
ΔD_x	Résistance à l'abrasion représentée par les changements Dx après abrasion	μm	Abrasion avec billes d'acier rotatives $\Delta D_x = \Delta_{\text{before}} - \Delta_{\text{after}}$ abrasion	RX-29 Ro-Tap (W.S. Tyler, Mentor, Ohio, USA)	Paré et al. (2009), adapté de Kiekens et al. (1999), Kemper et Roseneau (1986)
% = pourcentage massique soit $\text{g g}^{-1} \times 100$. Pour θ_x, les courbes de remontée capillaire ont été complétées avec les répliques et l'équation $y = m \ln(x) + b$, θ_x = sorption d'eau $\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, x = tension (-m) et b = asymptote $\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$					

TABLEAU 4. MÉTHODES D'ANALYSE DES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

NOMENCLATURE	NOM	UNITÉS	MÉTHODE	APPAREIL	RÉFÉRENCE
PROPRIÉTÉS RELATIVES À L'ACIDITÉ					
pH _{H2O}	pH à l'eau	—	pH à l'eau	pH-mètre (VWR SB20)	Rajkovich et al. (2011), AGDEX (1989)
PT _{pH4}	Pouvoir tampon à pH 4	meq HCl	Extraction HCl 1 N	Électrode potentiométrique couplée à un pH-mètre (VWR SB20)	Rajkovich et al. (2011), AGDEX (1989)
PT _{pH7}	Pouvoir tampon à pH 7	meq HCl	Extraction HCl 1 N	Électrode potentiométrique couplée à un pH-mètre (VWR SB20)	Rajkovich et al. (2011), AGDEX (1989)
PROPRIÉTÉS RELATIVES AUX PLANTES					
N _{tot}	Teneur totale en azote	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et al. (2014) et Brewer (2012)
P _{tot}	Teneur totale en P	mg Kg ⁻¹	Méthode modifiée des cendres	ICP-AES	Enders et Lehmann (2012), IBI (2012)
P _{ex}	Teneur eh P échangeable	cmol (+) Kg ⁻¹	Acide formique à 2%	Spectrophotomètre	Wang et al. (2012), Rajan et al. (1992), AOAC (2005)
K _{ex} , Ca _{ex} , Mg _{ex} , Na _{ex}	Teneur en éléments échangeables (nutriments)	cmol (+) Kg ⁻¹	Extraction CaBr ₂ -NH ₄ Cl	ICP Optima 4300DV Perkin-Elmer	Amacher et al. (1990)
Ex _{tot}	Somme des éléments échangeables	cmol (+) Kg ⁻¹	Calcul	—	—
P _{sol}	Teneur en phosphore soluble	mg L ⁻¹	Extraction à l'eau	ICP-AES	Enders et Lehmann (2012), IBI (2012)
K _{sol} , Ca _{sol} , Mg _{sol} , Na _{sol} , Mn _{sol} , Fe _{sol} , Al _{sol} , Cu _{sol} , Zn _{sol}	Teneur en éléments solubles à l'eau (macronutriments et micronutriments, métalloïdes)	mg L ⁻¹	Extraction à l'eau	ICP Optima 4300DV Perkin-Elmer	AGDEX 533 (1989)
PROPRIÉTÉS RELATIVES À L'ENVIRONNEMENT					
Cu, Zn, As, Cd, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Se	Teneur en éléments totaux (métaux lourds, micro et macronutriments et métalloïdes)	mg Kg ⁻¹	Méthode modifiée des cendres	ICP-AES	Enders et Lehmann (2012), IBI (2012)
% = Pourcentage massique soit g g ⁻¹ x 100.					

TABLEAU 5. MÉTHODES D'ANALYSE DES PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES

NOMENCLATURE	NOM	UNITÉS	MÉTHODE	APPAREIL	RÉFÉRENCE
Vers _x	Pourcentage de vers de terre (<i>Eisenia fetida</i> sp.) qui ont choisi le mélange contenant du biochar à x% V/V de biochar dans la terre à jardin	%	Contenants de terre séparés en deux parties, terre et terre+biochar, 20°C, 24 h	Laboratoire	IBI (2012), ISO 17512-1 (2008), Major (2009)
Laitue _{y/x}	Taux de germination de la laitue (<i>Lactuca sativa</i> var. <i>Buttercrunch</i>) au jour y dans un mélange de x% V/V de biochar dans la terre à jardin	%	Plat de Pétri en chambre de croissance à 22°C: 16 h jour /15°C: 8 h nuit. Pas de brumisation	Chambre à environnement contrôlé	IBI (2012), OECD (1984), ISO 17126 (2005), Van Zwieten et al. (2010)

TABLEAU 6. COMPARAISON DES ANALYSES DE CE RAPPORT AVEC CELLES DES ANALYSES SUGGÉRÉES PAR L'IBI (2012) ET L'EBC (2012)

PARAMÈTRE	ALLAIRE ET COLL.	IBI	EBC
PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES			
Cendres	Donnée	Requise	Requise
C	C _{tot} et C _{org}	C _{tot} requise	C _{org} Requise
H/C _{org}	Donnée	Requise	Requise
O/C	Donnée	Requise	Non requise
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES			
ρ _b	Donnée	Requise	Non requise
ρ _s , θ	Donnée	Non requise	Non requise
CE	Donnée	Requise	Requise
SS	Non donnée	Requise	Optionnelle
θ _g	Donnée	Requise	Requise
θ	Donnée	Non requise	Non requise
Granulométrie	Plusieurs paramètres	Non requise	Requise
RA	Donnée	Non requise	Non requise
PROPRIÉTÉS CHIMIQUES			
pH _{H2O}	pH _{H2O}	Requis, pH _{CaCl2}	Requis, pH _{H2O}
PT	Donnée	Non requise	Non requise
CaCO _{3equ}	Non mesurée	Non requise	Requise
Éléments échangeables	Données	Non requise	CEC suggérée
Éléments solubles	Données	Non requise	Non requise
Métaux lourds et métalloïdes	Données	Requise	Requise
HAP	Non donnée	Requise	Requise
BCP	Non mesurée	Requise	Requise
PCDD	Non mesurée	Requise	Requise
PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES			
Vers	Donnée	Non requise	Suggérée
Laitue	Donnée	Non requise	Requise

IBI : International Biochar Initiative. EBC : European Biochar Certificate. N.B. La plupart des analyses requises par l'IBI et l'EBC n'utilisent pas les mêmes méthodes de mesure. Celles mesurées par notre équipe, mais non listées dans ce tableau indiquent qu'elles ne sont pas obligatoires ou suggérées ni par une ni par l'autre des organisations.

5. Résultats

5.1. PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES

Dans l'industrie énergétique, les cendres sont inutiles, voire un résidu indésirable. Un biochar contenant plus de cendres est généralement moins efficace énergétiquement.

Par contre, dans le cas d'une application au sol pour la croissance végétale, nous pouvons considérer les cendres comme un amendement en minéraux.

Elles sont désirées lorsque les contenus en métaux lourds ne dépassent pas les normes environnementales. Certains font d'ailleurs des applications agricoles de cendres seulement. Par contre, une teneur en cendres élevée indique moins de carbone.

Dans le cas d'un apport au sol pour la séquestration du carbone ou comme amendement organique, nous cherchons le biochar contenant le moins de cendres et le plus de carbone possible.

Le pourcentage de cendres des biochars varie énormément, soit de 1 à 31 % du poids sec (Tableau 7). Ceux qui contiennent le moins de cendres ont été fabriqués à partir de bois mou résineux, alors que celui qui en contient le plus a été fabriqué à partir de fumier de poulet. Il est normal que ce biochar en contienne beaucoup puisque les poulets sont nourris en partie avec des éléments minéraux. Les biochars faits à partir du phragmite, du chou et celui fait à partir du lisier de porc contiennent plus de 20 % de cendres. Ceux qui contiennent le plus

ou le moins de cendre ne correspondent pas à ceux qui montrent le plus de variation dans leur teneur en cendres. Les plus variables sont les BQ-Maple-500-3 et ceux d'Airex fabriqués à partir de sciure de résineux. La variabilité du taux de cendres est induite principalement par les étapes de manutention qui contamaine plus ou moins les MOR. Par exemple, le BQ-Maple-500-3 est plutôt variable puisqu'il est fait de résidus de charbonnerie qui tombent lors de la manutention du bois comme des fragments de charbon, des écorces et du sable. Ces résidus varient selon la saison.

La plupart des biochars rencontrent les normes de l'EBC, soit plus de 50 % de Ct_{tot}, sauf ceux fabriqués à l'aide de la technologie Airex à partir de bois recyclé (Airex-RW-315 et 426). Seuls deux biochars fabriqués à partir d'érable (Maple_101_AGRICAN et BQ-Maple-500-1) en contiennent plus de 80 %. Les coefficients de

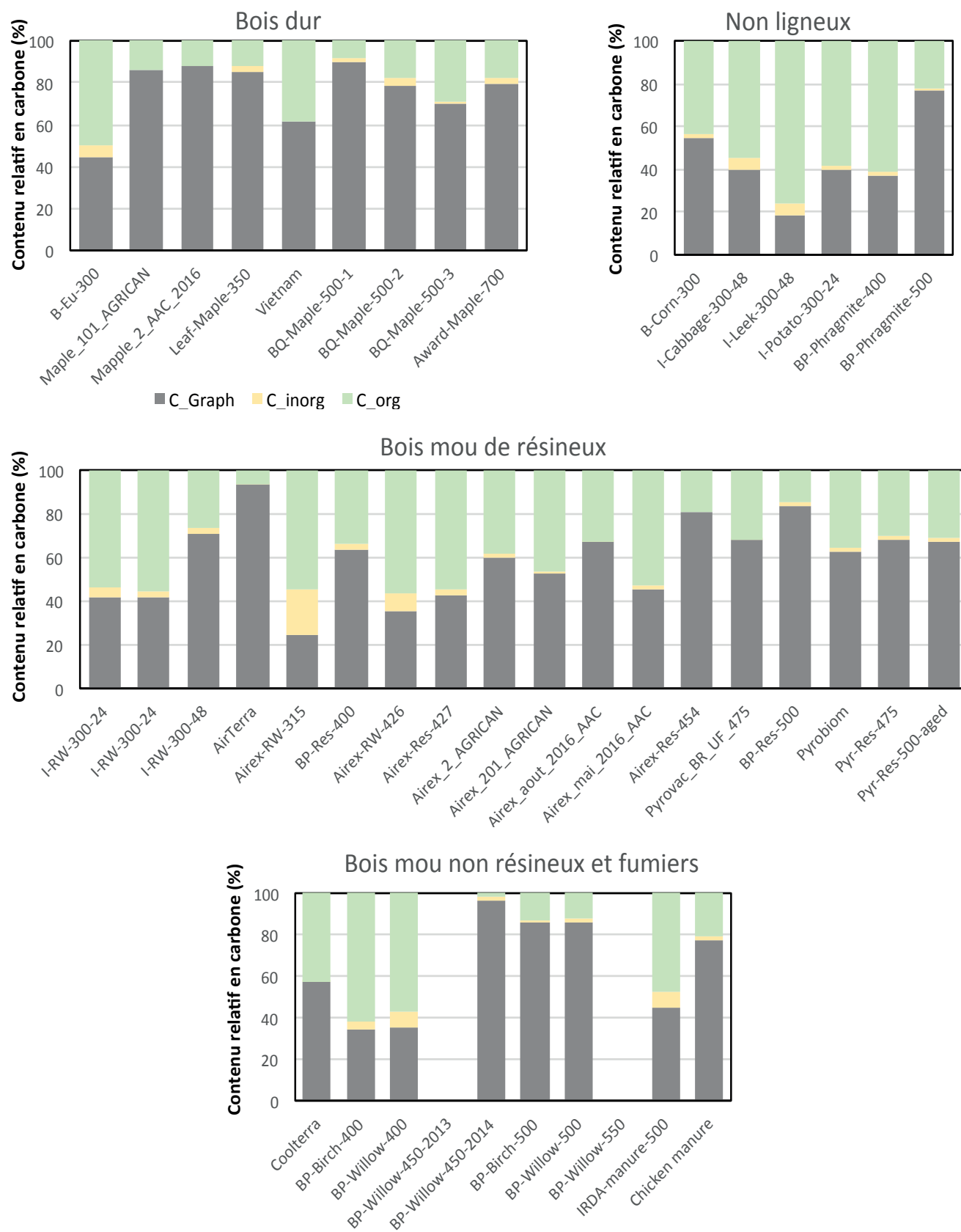
variation (CV) du Ct_{tot} sont tous très faibles ($\leq 4\%$). Proportionnellement au Ct_{tot}, C_{graph} est en général plus élevé avec le bois dur, suivi du bois mou non résineux, du bois mou résineux, des fumiers et des matières non ligneuses (Figure 1). Le C_{graph} est le plus stable dans le temps. Maple_101_AGRICAN, BQ-Maple-500-1 et Air terra en contiennent plus de 70 %. Les ratios H/C montrent que 7 biochars ne respectent pas la norme fixée de l'IBI qui stipule que le ratio H/C ne doit pas dépasser 0,7. Trois de ces 7 biochars sont fabriqués à partir de matières non ligneuses (chou, poireau et pomme de terre), 3 sont produits à partir de résineux à l'aide de la technologie d'Airex et le dernier à partir de fumier de porc. Les biochars d'érable ont tendance à donner des ratios O/C_{tot} plus faibles (Tableau 7), alors que les matières non ligneuses ont tendance à donner des valeurs passablement plus élevées. Toutefois, les valeurs les plus élevées ont été obtenues avec Airex-RW-315 et 426.



TABLEAU 7. PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES BIOCHARS (%)

BIOCHARS	CENDRES	POUVOIR CALORIFIQUE	H	O	N	C	C _{graph}	H/C _{org}	O/C
	%	MJ kg ⁻¹	%	%	%	%	%	—	—
BOIS DURS									
B-Eu-300	10,0	—	3,3	27,4	0,5	58,5	24,9	0,69	0,40
Maple_101_AGRICAN	3,6	30,5	2,6	10,3	0,4	81,9	70,7	0,37	0,09
Mapple_2_AAC_2016	3,4	30,1	2,1	9,2	0,3	79,7	67,4	0,33	0,09
Leaf-Maple-350	11,9	23,2	2,3	9,6	0,6	69,6	57,8	0,42	0,11
Vietnam	8,6	26,9	3,1	17,0	0,5	67,0	34,4	0,54	0,24
BQ-Maple-500-1	5,1	23,3	2,6	10,0	0,6	80,4	71,7	0,39	0,09
BQ-Maple-500-2	12,5	25,6	2,4	13,1	0,6	68,4	53,5	0,43	0,15
BQ-Maple-500-3	12,2	24,7	2,7	10,0	0,8	72,0	48,4	0,44	0,11
Award-Maple-700	14,2	—	1,9	10,2	0,6	65,6	51,7	0,34	0,12
BOIS MOUX RÉSINEUX									
I-RW-300-24	—	—	2,7	22,3	0,9	57,0	22,8	0,59	0,32
I-RW-300-24	19,3	20,9	3,2	22,1	0,7	61,5	25,5	0,63	0,28
I-RW-300-48	10,7	-	1,9	20,5	0,9	51,9	36,9	0,44	0,34
AirTerra	5,6	29,4	0,3	7,5	0,2	81,7	76,2	0,05	0,07
Airex-RW-315	—	—	5,0	33,1	0,5	44,5	10,7	1,70	0,73
BP-Res-400	13,8	25,5	3,6	16,2	1,2	67,9	42,2	0,64	0,16
Airex-RW-426	—	—	3,3	23,3	0,5	46,9	16,0	0,92	0,43
Airex-Res-427	1,4	—	3,4	17,4	0,3	69,7	29,8	0,61	0,18
Airex_2_AGRICAN	1,7	—	3,7	19,1	0,1	73,6	41,2	0,61	0,21
Airex_201_AGRICAN	3,0	26,7	3,7	20,2	0,1	73,0	37,5	0,60	0,22
Airex_august_2016_AAC	6,9	25,1	3,3	14,7	0,2	70,7	43,6	0,57	0,17
Airex_may_2016_AAC	2,0	26,1	4,2	23,9	0,1	68,3	29,6	0,75	0,27
Airex-Res-454	1,6	29,1	3,0	10,8	0,2	75,9	60,3	0,47	0,11
Pyrovac_BR_UF_475	1,2	30,2	3,6	14,9	0,0	77,7	52,4	0,56	0,15
BP-Res-500	10,7	26,8	2,7	11,0	1,3	73,8	60,0	0,45	0,12
Pyrobiom	6,3	26,7	3,4	18,9	0,3	72,8	43,9	0,57	0,21
Pyr-Res-475	8,1	—	2,8	20,8	0,5	62,1	42,1	0,54	0,26
Pyr-Res-500-aged	9,9	23,4	2,5	21,0	0,5	62,2	40,2	0,46	0,27
BOIS MOUX NON RÉSINEUX									
Coolterra	2,0	—	3,3	17,4	0,4	72,5	41,5	0,55	0,19
BP-Birch-400	7,3	27,3	4,0	17,0	0,9	72,9	24,6	0,67	0,18
BP-Willow-400	11,1	26,3	3,6	16,2	1,0	67,6	23,7	0,68	0,19
BP-Willow-450-2013	9,8	—	2,8	16,0	1,1	68,2	—	—	—
BP-Willow-450-2014	11,6	27,3	2,5	14,5	0,9	71,7	67,5	0,39	0,16
BP-Birch-500	10,5	26,6	2,6	11,9	1,0	73,1	59,9	0,43	0,13
BP-Willow-500	12,2	26,7	2,6	13,7	1,1	71,7	61,6	0,44	0,15
BP-Willow-550	9,6	—	2,4	10,5	1,2	75,1	—	—	—
NON LIGNEUX									
B-Corn-300	5,3	—	3,8	14,7	0,9	71,4	37,7	0,64	0,16
I-cabbage-300-48	20,0	—	4,2	20,8	3,7	55,0	21,8	0,94	0,30
I-Leek-300-48	18,1	—	4,3	18,8	5,7	54,7	10,1	0,99	0,27
I-Potato-300-24	9,9	—	4,3	20,6	2,9	62,4	24,8	0,83	0,25
BP-Phragmite-400	26,3	22,3	3,0	14,0	1,2	58,4	21,2	0,62	0,19
BP-Phragmite-500	28,6	21,1	2,5	14,7	1,2	57,7	43,2	0,49	0,22
FUMIERS									
IRDA-manure-500	21,7	—	3,1	19,3	4,5	52,8	23,5	0,75	0,30
Chicken manure	31,2	19,3	2,1	18,7	2,7	51,8	40,2	0,48	0,28

FIGURE 1. TENEURS RELATIVES EN DIFFÉRENTS TYPES DE CARBONE DANS LES BIOCHARS
(GRIS : C_{graph} ; BEIGE : C_{inorg} ; VERT : C_{org})



5.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

La masse volumique apparente (ρ_b) de tous les biochars est très faible, soit près de celle de la tourbe (Tableau 8). Les valeurs les plus élevées proviennent des biochars fabriqués de fumier de poulet (Chicken manure), d'eucalyptus (B-Eu-300), de coco (Vietnam) et de phragmite (BP-Phragmite-400 et 500), alors que les biochars produits dans le laboratoire expérimental (I-...) et ceux produits à l'aide de la technologie d'Airex tendent à donner les valeurs les plus faibles.

Des valeurs faibles sont excellentes pour une utilisation dans les terreux ou pour décompacter les sols, mais ces biochars coûtent plus cher à transporter et à ensacher.

La granulométrie influence ces valeurs de ρ_a . Les masses volumiques réelles (ρ_s) ont tendance à se ressembler et à se rapprocher de celles de la tourbe ou de la matière organique du sol variant

de 1,25 à 1,95 g cm⁻³ (Tableau 10). Basées sur ρ_b et ρ_s , les valeurs de P tendent aussi vers des valeurs un peu plus élevées que la tourbe blonde variant de 0,58 à 0,91 m³/m⁻³. Aucune valeur ne peut poser problème pour des applications aux sols, en productions maraîchères, horticoles ou en pépinière ni pour la filtration de l'eau. Ceux fabriqués dans le four expérimental (I-...) tendent à avoir une plus grande porosité à cause de leur granulométrie grossière.

La conductivité électrique CE varie peu entre les biochars, excepté pour ceux fabriqués dans le laboratoire expérimental avec des résidus maraîchers (I-Patates-300-24, I-Chou-300-48, I Poireau-300-48) et avec du fumier de poulet. Ceux fabriqués par Pyrovac (Pyr-...) et Airex (Airex-...) ont tendance à avoir une plus faible CE. Il n'y a aucun biochar dont la salinité pourrait poser problème aux plantes lorsque mélangé aux sols à moins d'être utilisé pour des cultures en serre où la salinité augmente rapidement (biochars maraîchers).



TABLEAU 8. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET RÉELLE; POROSITÉ ET CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES BIOCHARS

BIOCHAR	ρ_s	ρ_b	POROSITÉ	CE
	g cm^{-3}	g cm^{-3}	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	dS m^{-1}
BOIS DURS				
B-Eu-300	1,63	0,46	0,72	0,68
Maple_101_AGRICAN	1,53	0,26	0,83	0,36
Mapple_2_AAC_2016	1,58	0,23	0,86	0,56
Leaf-Maple-350	1,68	0,39	0,77	0,35
Vietnam	1,49	0,44	0,71	2,41
BQ-Maple-500-1	1,53	0,26	0,83	0,40
BQ-Maple-500-2	1,66	0,33	0,80	0,88
BQ-Maple-500-3	1,54	0,29	0,81	0,38
Award-Maple-700	1,77	0,35	0,80	0,63
BOIS MOUX RÉSINEUX				
I-RW-300-24	1,62	0,18	0,89	0,74
I-RW-300-24	1,66	0,18	0,89	1,37
I-RW-300-48	1,63	0,18	0,89	1,46
AirTerra	1,95	0,17	0,91	0,31
Airex-RW-315	1,48	0,28	0,81	0,72
BP-Res-400	1,45	0,39	0,73	0,40
Airex-RW-426	1,52	0,26	0,83	0,88
Airex-Res-427	1,48	0,21	0,86	0,10
Airex_2_AGRICAN	1,42	0,19	0,87	0,17
Airex_201_AGRICAN	1,43	0,18	0,87	0,17
Airex_august_2016_AAC	1,43	0,19	0,87	0,23
Airex_may_2016_AAC	1,43	0,22	0,85	0,25
Airex-Res-454	1,48	0,19	0,87	0,11
Pyrovac_BR_UF_475	1,41	0,14	0,90	0,16
BP-Res-500	1,52	0,42	0,72	0,62
Pyrobiom	1,49	0,36	0,76	0,33
Pyr-Res-475	1,55	0,30	0,80	0,17
Pyr-Res-500-aged	1,54	0,31	0,80	0,15
BOIS MOUX NON RÉSINEUX				
Coolterra	1,35	0,57	0,58	0,26
BP-Birch-400	1,41	0,39	0,72	0,28
BP-Willow-400	1,46	0,34	0,77	0,37
BP-Willow-450-2013	1,57	0,31	0,80	1,54
BP-Willow-450-2014	1,51	0,36	0,76	0,46
BP-Birch-500	1,53	0,40	0,74	0,44
BP-Willow-500	1,51	0,32	0,79	0,50
BP-Willow-550	1,61	0,31	0,81	2,25
NON LIGNEUX				
B-Corn-300	1,62	0,33	0,79	0,25
I-Cabbage-300-48	1,39	0,18	0,87	5,25
I-Leek-300-48	1,38	0,17	0,88	3,98
I-Potato-300-24	1,25	0,13	0,90	2,36
BP-Phragmite-400	1,54	0,39	0,75	0,32
BP-Phragmite-500	1,59	0,42	0,74	0,33
FUMIERS				
IRDA-manure-500	1,59	0,33	0,79	1,83
Chicken manure	1,70	0,65	0,62	6,39
Moyenne de 3 réplicats				

Les propriétés hydriques varient grandement entre les biochars (Tableau 9). Elles sont beaucoup influencées par la granulométrie, la porosité interne et externe des particules ainsi que par la surface de tension ce qui les rend hydrophiles ou hydrophobes à différentes teneurs en eau. D'autres propriétés influençant les propriétés hydriques n'ont pas été mesurées, par exemple l'hydrophobicité des biochars. La remontée capillaire révèle que certains biochars sorbent très rapidement l'eau liquide disponible autour d'eux (Figure 2). Par exemple, le BP-Willow-500, le chicken manure et le BP-Birch-500 sorbent dès qu'ils entrent en contact avec le milieu humide. Comparativement, le Pyr-Res-475, le I-Cabbage-300-48, le Vietnam et le Airex-Res-454 sorbent beaucoup d'eau, mais surtout lorsque le sol est trempé. Ils ont plus de difficulté lorsque le sol est seulement humide.

Par ailleurs, d'autres biochars restent relativement secs même dans des conditions très mouillées comme c'est le cas des BQ-Maple-500-... et de plusieurs biochars Airex. En 72 h, Airex-Res-454 peut sorber plus de 320 % de son poids en eau sous une tension -0,05 m (détrempé) suivi de Coolterra et I-Cabbage-300-48 qui peuvent sorber à cette même tension plus de 200 % de leur poids en eau. D'autres par contre ne sorbe presque rien (-10 %) même en condition détrempee tels que les biochars de bois durs (excepté Vietnam) ou certains Airex-... ou BP-....

Puisqu'il faut une plus grande force pour extraire l'eau d'un milieu plus sec, les taux de sorption ne sont pas aussi élevés avec une tension de -1,5 m qu'avec -0,05 m. L'ordre des plus sorbants aux moins sorbants change selon les tensions. Ce comportement ressemble à celui de la tourbe. C'est donc dire que tous les biochars ne sont pas capables de sorber l'eau, ceci est contraire aux énoncés de la littérature.

Certains biochars présentent une hydrophobicité, un peu comme la tourbe lorsqu'elle est sèche et d'autres sont hydrophiles.

Comparativement à la sorption de l'eau liquide dans un milieu humide, la sorption de l'humidité de l'air (HR) réfère à la vapeur d'eau. La granulométrie est importante pour la sorption de l'eau liquide, mais l'est beaucoup moins pour la vapeur d'eau. Les propriétés de surface le sont davantage. Tous les biochars sorbent un minimum de 5 % de leur poids en eau sous forme vapeur pendant 72 h sous une condition d'humidité relative de 80 %, mais I-Potatoe-300-24 et Airterra en sorbent environ 15 %. Les biochars Pyr-Res-475, Pyr-Res-500-Aged et I-Leek-300-48 suivent de près avec un taux de sorption de plus de 12 %.

Il sera important d'ensacher les biochars dont le taux de sorption de l'humidité de l'air est élevé. Il faudra aussi faire attention lors d'application au champ par temps humide.



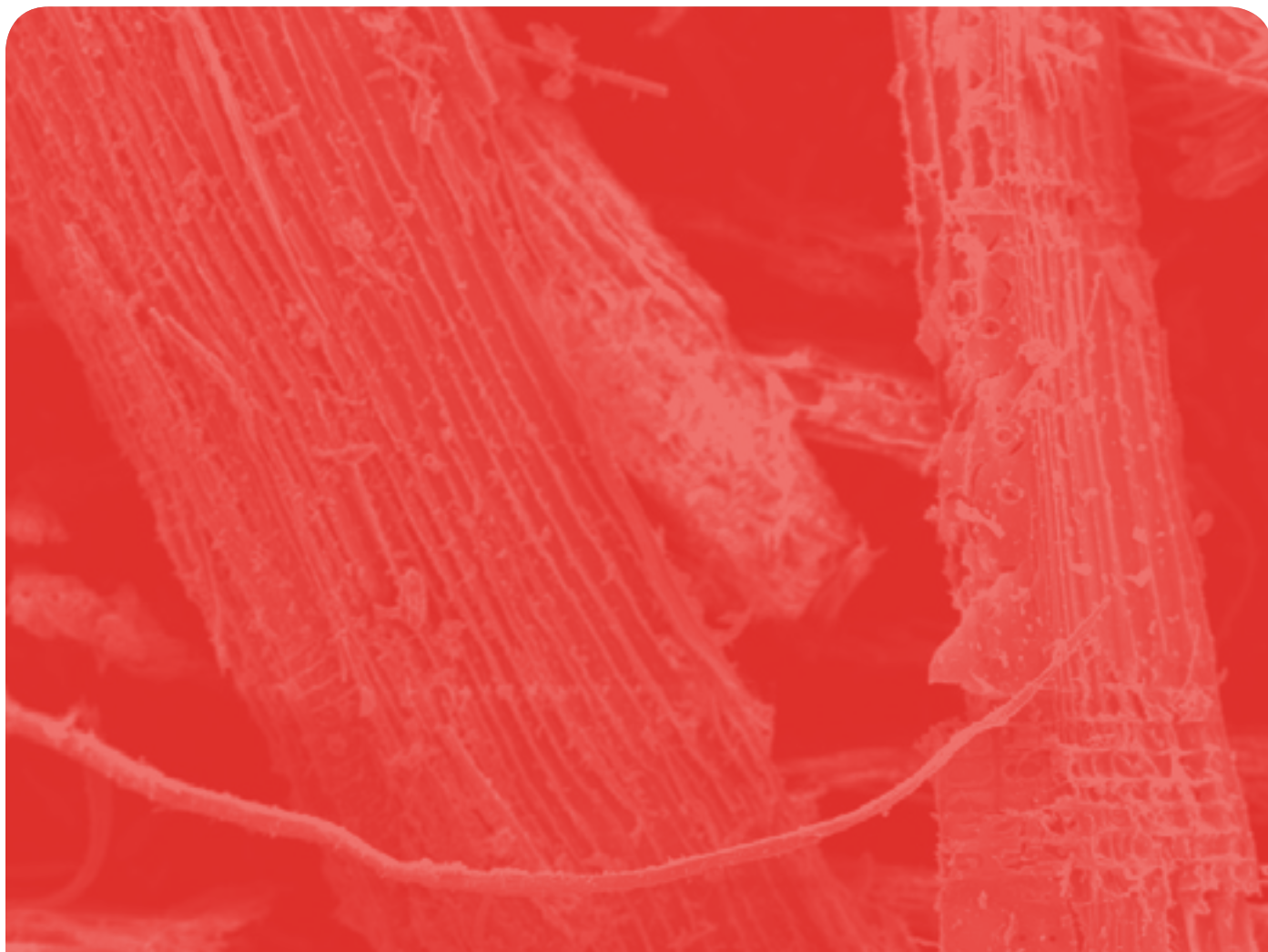
TABLEAU 9. PROPRIÉTÉS DES BIOCHARS RELATIVES À L'EAU

BIOCHAR	RH	θ_{qm}	θ_{q_b}	θ_{-140}	θ_{-5}
	%	$g\ g^{-1}\ h^{-1}$	$g\ g^{-1}\ h^{-1}$	% (72 h)	% (72 h)
BOIS DURS					
B-Eu-300	6,14	-0,0015	0,0095	41,3	48,0
Maple_101_AGRICAN	7,02	-0,0003	0,0022	11,4	12,8
Mapple_2_AAC_2016	7,19	-0,0011	0,0079	35,9	43,1
Leaf-Maple-350	5,90	-0,0006	0,0051	23,5	29,3
Vietnam	6,95	—	—	0,0	0,0
BQ-Maple-500-1	5,98	-0,0004	0,0041	21,3	23,5
BQ-Maple-500-2	6,14	-0,0056	0,0286	43,8	160,6
BQ-Maple-500-3	5,24	-0,0013	0,0087	39,2	43,8
Award-Maple-700	5,93	-0,0005	0,0047	23,0	27,1
BOIS MOUX RÉSINEUX					
I-RW-300-24	7,04	-0,0001	0,0122	57,0	105,4
I-RW-300-24	8,42	-0,0012	0,0070	21,1	38,8
I-RW-300-48	8,65	-0,0061	0,0294	41,4	158,3
AirTerra	14,77	—	—	0,0	0,0
Airex-RW-315	9,90	0,0000	0,0066	33,7	53,2
BP-Res-400	5,67	0,6581	0,0177	46,6	52,4
Airex-RW-426	5,94	0,0000	0,0066	32,6	53,3
Airex-Res-427	6,11	-0,0004	0,0028	12,3	16,1
Airex_2_AGRICAN	7,24	-0,0002	0,0017	8,4	10,2
Airex_201_AGRICAN	7,84	-0,0002	0,0018	7,2	10,9
Airex_august_2016_AAC	5,45	-0,0009	0,0058	22,0	31,9
Airex_may_2016_AAC	4,76	-0,0044	0,0209	28,9	114,9
Airex-Res-454	6,79	-0,0003	0,0306	111,8	322,4
Pyrovac_BR_UF_475	3,75	—	—	—	—
BP-Res-500	6,04	0,8879	0,0219	125,9	119,8
Pyrobiom	6,31	—	—	—	—
Pyr-Res-475	12,44	-0,0098	0,0465	121,0	223,1
Pyr-Res-500-aged	13,17	-0,0002	0,0260	134,7	216,8
BOIS MOUX NON RÉSINEUX					
Coolterra	8,51	0,0000	0,0043	20,9	35,4
BP-Birch-400	5,29	0,7428	0,0114	40,6	44,5
BP-Willow-400	6,72	0,7159	0,0152	48,5	51,6
BP-Willow-450-2013	—	-0,0059	0,0332	139,7	147,2
BP-Willow-450-2014	5,62	-0,0098	0,0478	137,1	144,5
BP-Birch-500	6,58	0,6496	0,0551	138,8	149,5
BP-Willow-500	7,62	0,5300	0,1349	213,0	210,3
BP-Willow-550	—	-0,0059	0,0316	124,2	142,4
NON LIGNEUX					
B-Corn-300	6,17	-0,0034	0,0195	72,0	99,1
I-Cabbage-300-48	11,12	-0,0069	0,0394	105,8	211,8
I-Leek-300-48	12,75	-0,0013	0,0197	64,7	95,9
I-Potato-300-24	14,58	-0,0028	0,0182	64,2	96,8
BP-Phragmite-400	5,71	-0,0056	0,0279	48,1	107,1
BP-Phragmite-500	6,20	0,5791	0,0221	128,2	124,1
FUMIERS					
IRDA-manure-500	9,25	-0,0011	0,0088	41,8	48,3
Chicken manure	7,70	-0,0024	0,0220	120,9	120,1
Moyenne de 3 réplicats					

Le biochar B-Eu-300 est le plus fin, suivi des biochars fabriqués par Biopterre à l'aide de la technologie Abri-Tech (Tableau 10). Des biochars aussi fins ont tendance à produire beaucoup de poussière nuisible pour les travailleurs et sont très salissants. De plus, ils ne peuvent pas être mélangés directement avec des engrais composés sauf si chaque particule d'engrais contient tous les nutriments. Lorsque mélangés avec d'autres ingrédients, par exemple pour fabriquer des terreaux, ils peuvent être lessivés en plus de diminuer la vitesse de drainage ou de colmater les trous de drainage. Les plus grossiers concernent ceux fabriqués à partir de résidus maraîchers et ceux à base d'érable. Ces derniers sont trop grossiers pour être mélangés aux engrais et incorporés aux sols. Les autres ont une granulométrie intéressante tant pour une application aux sols qu'en terreaux.

L'uniformité de la granulométrie varie beaucoup d'un biochar à l'autre

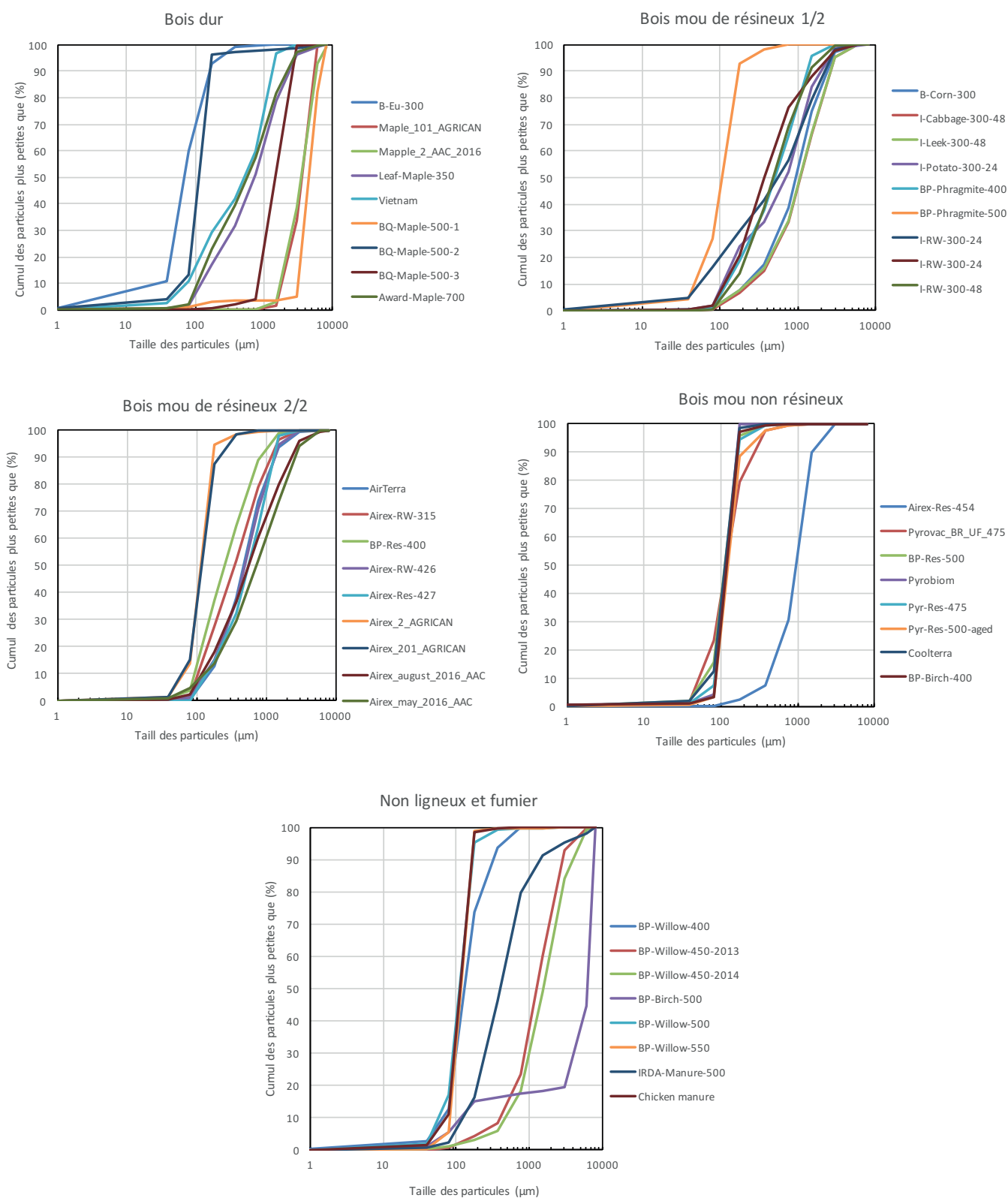
(Figure 3), tout dépend de la matière première, du tamisage en préconditionnement ou après la pyrolyse. Certaines courbes granulométriques sont très étendues c'est-à-dire qu'elles présentent une grande hétérogénéité de taille des particules comme c'est le cas pour les biochars Award-Maple-700 et Leaf-Maple-350. Le BQ-Maple-500-1 donne l'exemple d'une granulométrie homogène. Selon l'utilisation, une granulométrie homogène peut être souhaitable, alors que d'autres usages requièrent une granulométrie hétérogène. Toutefois, on cherche généralement à ce que cette granulométrie reste la même lorsque le biochar est soumis au transport, à la manutention, etc. Ceux déjà tamisés et les plus fins ont déjà subi les forces de rupture et sont généralement plus résistants (DDMP, Tableau 12), mais ce n'est pas toujours vrai. Outre les grosses particules des biochars fabriqués à partir de produits maraîchers qui se brisent beaucoup, celles de Leaf-Maple-350 et de BQ-Maple-500-1 se brisent significativement.



**TABLEAU 10. PROPRIÉTÉS DES BIOCHARS RELATIVES À LA GRANULOMÉTRIE
ET À LA RÉSISTANCE À L'ABRASION**

BIOCHARS	DMP	D10	IU60	DDMP	DD10
	µm	µm	—	µm	µm
BOIS DURS					
B-Eu-300	138	19	8,30	—	—
Maple_101_AGRICAN	4970	1903	2,20	—	—
Mapple_2_AAC_2016	4889	1795	2,33	—	—
Leaf-Maple-350	1397	155	6,34	-281	-47
Vietnam	875	86	9,31	—	—
BQ-Maple-500-1	6107	3194	1,60	-655	-2246
BQ-Maple-500-2	287	68	2,20	-15	16
BQ-Maple-500-3	2191	847	2,06	—	—
Award-Maple-700	1242	128	6,42	-94	-11
BOIS MOUX RÉSINEUX					
I-RW-300-24	1592	247	4,88	—	—
I-RW-300-24	1837	275	4,98	-72	-51
I-RW-300-48	1814	247	5,47	-150	-76
AirTerra	1223	122	7,58	—	—
Airex-RW-315	901	140	4,82	—	—
BP-Res-400	189	51	2,74	—	—
Airex-RW-426	1210	58	14,91	—	—
Airex-Res-427	961	132	3,91	-62	-6
Airex_2_AGRICAN	960	164	3,88	—	—
Airex_201_AGRICAN	890	172	3,52	—	—
Airex_august_2016_AAC	716	117	4,14	—	—
Airex_may_2016_AAC	545	101	14,57	—	—
Airex-Res-454	884	154	4,09	—	—
Pyrovac_BR_UF_475	902	159	4,39	—	—
BP-Res-500	204	68	2,20	—	—
Pyrobiom	209	73	2,17	—	—
Pyr-Res-475	1302	138	5,45	-97	-12
Pyr-Res-500-aged	1543	149	6,93	—	—
BOIS MOUX NON RÉSINEUX					
Coolterra	1400	402	2,95	—	—
BP-Birch-400	226	58	2,69	—	—
BP-Willow-400	194	65	2,23	—	—
BP-Willow-450-2013	192	87	1,71	4	4
BP-Willow-450-2014	202	86	1,75	6	3
BP-Birch-500	236	89	1,78	—	—
BP-Willow-500	194	70	2,06	—	—
BP-Willow-550	202	88	1,72	-4	4
NON LIGNEUX					
B-Corn-300	253	69	2,47	—	—
I-cabbage-300-48	2102	419	3,63	-402	-227
I-Leek-300-48	2594	543	3,62	-853	-379
I-Potato-300-24	6017	133	49,42	-1062	-62
BP-Phragmite-400	198	64	2,27	—	—
BP-Phragmite-500	203	83	1,80	—	—
FUMIERS					
IRDA-manure-500	1014	147	3,64	-124	-25
Chicken manure	190	75	2,01	—	—
Moyenne de 3 réplicats					

FIGURE 2. COURBE GRANULOMÉTRIQUE DES DIFFÉRENTS BIOCHARS



5.3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Les pH varient entre 5,5 pour le Airex-Res-427 et 10,0 pour le biochar de fumier de poulet (Chicken manure), donc de relativement acide à très basique (Tableau 11). Les biochars de bois dur ont tendance à avoir des pH plutôt basiques entre 7,4 et 9, alors que ceux de bois mou résineux ont tendance à être un peu plus neutres, voir même légèrement acides. Les biochars de bois mous non résineux et les autres matières tendent aussi à être relativement basiques avec des pH généralement supérieurs à 7,5, particulièrement pour ceux produits avec des résidus maraîchers ayant des pH de plus de 9.

Les biochars ayant des pouvoirs tampons (PT) les plus importants sont le BP-Res-500, le BQ-Érable-500-2, le BP-Res-500 suivis de I-Cabbage-300-48 pour atteindre un pH 4. Ce sont sensiblement les mêmes qui offrent les meilleurs PT pour atteindre un pH 7. Malgré qu'on rapporte souvent dans la littérature que les biochars ont un excellent PT, notre gamme de biochars indique que 9 biochars (soit 1/5) nécessitent moins de 0,1 MeqHCl pour atteindre un pH de 4.

Malgré que la majorité des pH des biochars soient basiques, la plupart d'entre eux n'ont que peu de pouvoir tampon.

Ils vont très rapidement changer de pH en contact avec des éléments plus acides comme la tourbe ou la matière organique en décomposition.

Comme l'azote (N) se volatilise généralement lors de la pyrolyse, nous retrouvons des concentrations très faibles de N (<6%) dans les biochars. Les biochars ne peuvent donc pas être considérés comme des engrais azotés. Ceux faits à partir de produits maraîchers (I-Patates-300-24, I-Chou-300-48, I-Poireau-300-48) en contiennent 1 à 6 % (Tableau 17) et le biochar de lisier

de porc (IRDA-Lisier-500) environ 4,5 %, ce qui est rare. La grande taille des particules à pyrolyser et la basse température lors de la pyrolyse des résidus maraîchers favorisent une plus grande rétention de l'azote. Les teneurs en N ne peuvent donc pas causer des restrictions d'application des biochars en environnement.

En comparaison, quelques biochars contiennent passablement de P total. Les biochars de fumiers IRDA-manure-500 et chicken-manure ont les plus fortes teneurs de P. Certains biochars peuvent donc être utilisés comme un amendement de P aux plantes (ex: sols, terreaux), alors que les autres peuvent être privilégiés lorsqu'on veut éviter la problématique du P dans l'environnement. Dans le cas du P, certains biochars pourraient se voir restreindre certaines utilisations comme la filtration de l'eau ou l'application répétée de fortes doses dans des champs agricoles.

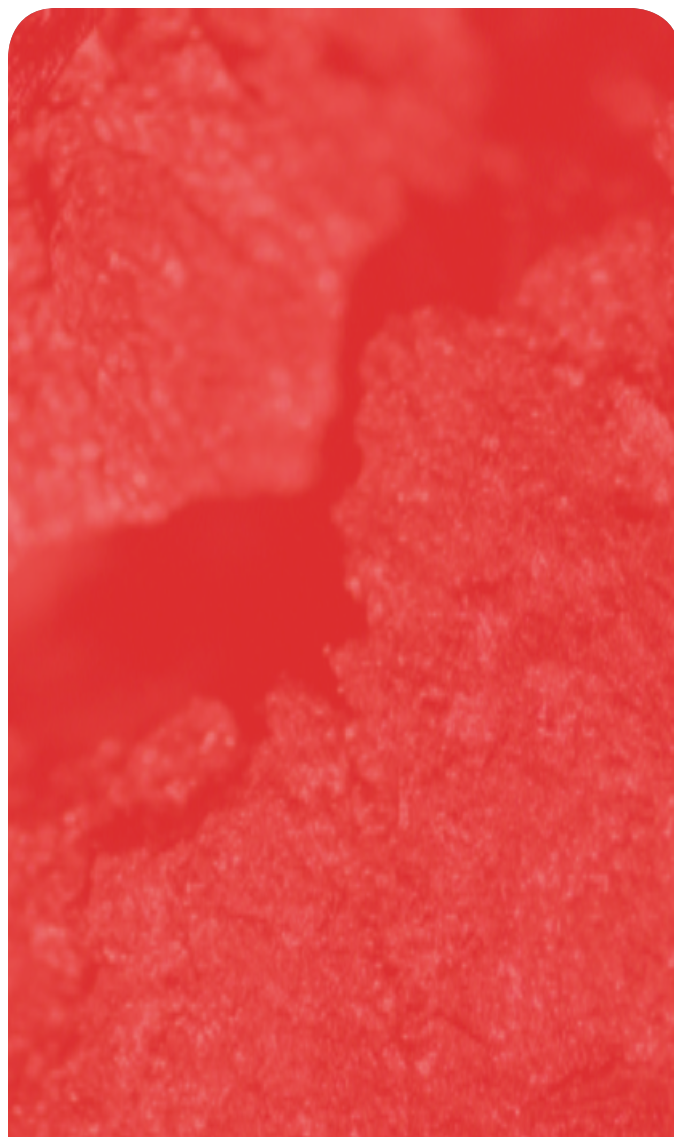


TABLEAU 11. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES BIOCHARS RELATIVES À L'ACIDITÉ

BIOCHARS	pH _{H2O}	PT _{pH4}	PT _{pH7}	N _{tot}	P _{tot}
	—	meq, HCl	meq, HCl	%	mg/kg
BOIS DURS					
B-Eu-300	8,1	0,2	0,0	0,5	1659
Maple_101_AGRICAN	7,4	0,0	0,0	0,4	291
Mapple_2_AAC_2016	7,9	0,1	0,0	0,3	5531
Leaf-Maple-350	8,6	0,6	0,0	0,6	1043
Vietnam	6,9	0,0	—	0,5	1400
BQ-Maple-500-1	7,6	0,2	0,0	0,6	550
BQ-Maple-500-2	8,9	1,6	0,1	0,6	1453
BQ-Maple-500-3	7,8	0,3	0,1	0,8	348
Award-Maple-700	8,4	1,0	0,1	0,6	806
BOIS MOUX RÉSINEUX					
I-RW-300-24	6,1	0,3	—	0,9	39
I-RW-300-24	6,1	0,2	—	0,7	241
I-RW-300-48	5,6	0,1	—	0,9	72
AirTerra	7,6	0,0	0,0	0,2	1197
Airex-RW-315	6,9	0,3	—	0,5	50
BP-Res-400	8,6	0,3	0,1	1,2	1110
Airex-RW-426	7,7	0,6	0,1	0,5	297
Airex-Res-427	5,5	0,0	—	0,3	221
Airex_2_AGRICAN	6,3	—	0,0	0,1	172
Airex_201_AGRICAN	5,7	—	0,0	0,1	177
Airex_august_2016_AAC	7,1	0,0	0,0	0,2	348
Airex_may_2016_AAC	6,6	0,0	—	0,1	197
Airex-Res-454	7,2	0,1	0,0	0,2	209
Pyrovac_BR_UF_475	6,1	0,0	—	0,0	135
BP-Res-500	9,8	1,5	0,7	1,3	3722
Pyrobiom	7,9	0,0	0,0	0,3	791
Pyr-Res-475	6,0	0,2	—	0,5	755
Pyr-Res-500-aged	6,4	0,3	—	0,5	467
BOIS MOUX NON RÉSINEUX					
Coolterra	6,6	0,0	—	0,4	639
BP-Birch-400	7,6	0,1	0,0	0,9	1415
BP-Willow-400	8,1	0,3	0,1	1,0	756
BP-Willow-450-2013	—	—	—	1,1	1699
BP-Willow-450-2014	9,6	0,6	0,1	0,9	1033
BP-Birch-500	8,8	1,0	0,3	1,0	459
BP-Willow-500	9,0	1,0	0,3	1,1	1259
BP-Willow-550	—	—	—	1,2	1620
NON LIGNEUX					
B-Corn-300	7,7	0,6	0,1	0,9	1780
I-Cabbage-300-48	9,9	1,4	0,4	3,7	9348
I-Leek-300-48	9,5	1,1	0,2	5,7	7029
I-Potato-300-24	9,3	0,8	0,2	2,9	10544
BP-Phragmite-400	7,6	0,2	0,0	1,2	1383
BP-Phragmite-500	7,7	0,1	0,0	1,2	1103
FUMIERS					
IRDA-manure-500	9,7	1,2	0,1	4,5	22796
Chicken manure	10,0	0,2	0,1	2,7	44909
Moyenne de 3 réplicats					

Les teneurs en macro et microéléments échangeables sont données au Tableau 12 et les solubles au Tableau 13. Ils varient grandement d'un biochar à l'autre. En règle générale, les biochars contiennent plusieurs nutriments ou l'ensemble des nutriments ce qui signifie qu'ils peuvent être considérés comme amendement aux plantes pour les micronutriments, sans dépasser la plupart des normes. Les biochars de produits maraîchers, suivis de ceux faits de fumiers, présentent les plus forts contenus en potassium (K), alors que les biochars de bois de recyclage présentent les plus faibles. La teneur en Ca varie aussi beaucoup, les biochars de Pyrovac (Pyr...) et de bois recyclés ayant tendance à en contenir légèrement plus. Nous n'observons pas de tendance spécifique pour le Mg et le Na. Le chicken-manure et le I-cabbage-300-48 se démarquent par leur forte teneur en Na. Ces teneurs élevées pourraient causer certains problèmes aux plantes, lorsqu'appliqués en grandes concentrations comme dans les terreaux. Par contre, le Na est facilement lessivable et ne resterait pas dans le biochar si on leur appliquait beaucoup d'eau comme cela se fait pour les cultures en serre et en pépinière. La somme des éléments échangeables varie entre $1,67 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ pour Pyrovac_BR_UF_475 à plus de $120 \text{ cmol}^+ \text{ Kg}^{-1}$ pour les biochars faits de résidus maraîchers et celui fait de fumier de poulet, ce qui offre une gamme intéressante pour la croissance des plantes et pour des applications environnementales.

La teneur en métaux lourds varie tout autant que celle des éléments solubles et échangeables (Tableaux 16 et 17). Par contre, le mercure (Hg) n'a jamais été détecté. C'est pourquoi il n'est pas listé dans le Tableau 17. Seulement 6 biochars contiennent de l'As. Cinq sont faits de bois recyclés, donc contenant probablement des vieilles peintures et traitements. Nous avons détecté le cadmium (Cd) dans 14 des 43 biochars, mais en faible quantité. Le cobalt (Co) est présent dans environ la moitié des biochars en quantité relativement faible. Seuls BP-Phragmite-400, Pyrobiom et IRDA-Lisier-500 en contiennent davantage soit plus de

13 mg kg^{-1} . Nous avons mesuré le Cr dans presque tous les biochars. Pyrobiom en contient environ 25 fois plus (812 mg kg^{-1}) que tous les autres qui en contiennent peu ($\leq 33 \text{ mg kg}^{-1}$). Dans le cas du cuivre (Cu), il a été détecté partout. Le biochar fabriqué à partir de lisier de porc en contient beaucoup soit 556 mg kg^{-1} puisque les porcs reçoivent du Cu et du zinc (Zn) dans leur alimentation et que plus de 99 % de leur ration est excrétée. Le molybdène (Mo) se retrouve dans 4 biochars seulement, dont les deux faits de fumiers, et ce, en faible quantité. Seulement 3 biochars ne contiennent pas de nickel (Ni). Le biochar de Pyrobiom en contient le plus (393 mg kg^{-1}) avec une teneur au moins 5 fois plus élevée que le deuxième, BP-Phragmite-500 ($67,8 \text{ mg kg}^{-1}$). Plus de la moitié des biochars (27 sur 43) ne contiennent pas de plomb (Pb). Le biochar Pyrobiom est celui qui en contient le plus suivi de près par les biochars faits de bois recyclés qui en contiennent plus de 45 mg kg^{-1} probablement à cause de l'ancienne peinture et autres traitements du bois. Seulement 8 biochars montrent un contenu en Se détectable. Airex-RW-426 en contient le plus suivi de BP-Phragmite-500. Le Zn se retrouve dans tous les biochars. Le biochar fait de fumier de poulet en contient au moins 5 fois plus que tous les autres. Les matières non ligneuses en contiennent peu ainsi que la plupart de ceux fabriqués de bois mous résineux.

Ces valeurs seront comparées aux normes environnementales et classées pour le Québec et selon l'IBI et l'EBC dans un autre document. Le contenu des biochars en macro et micronutriments sera aussi interprété pour les plantes dans un autre rapport.



**TABLEAU 12. TENEURS EN MACRO ET MICROÉLÉMENTS ÉCHANGEABLES DES BIOCHARS
(RELATIVES AUX PLANTES)**

BIOCHARS	Ntot	Ptot	K	Ca	Mg	Na	Total Exchang,
	%	mg kg ⁻¹	cmol(+) kg ⁻¹				
BOIS DURS							
B-Eu-300	0,5	1659	7,5	15	1,02	0,96	24,2
Maple_101_AGRICAN	0,4	291	8,7	3	0,68	0,27	12,2
Mapple_2_AAC_2016	0,3	5531	5,1	2	0,42	0,14	7,4
Leaf-Maple-350	0,6	1043	7,3	9	2,17	2,10	20,6
Vietnam	0,5	1400	14,3	1	1,43	8,24	25,2
BQ-Maple-500-1	0,6	550	2,7	5	0,45	0,44	8,3
BQ-Maple-500-2	0,6	1453	18,4	23	11,14	2,15	55,1
BQ-Maple-500-3	0,8	348	6,3	11	1,30	0,16	18,81
Award-Maple-700	0,6	806	8,1	14	2,23	2,04	26,3
BOIS MOUX RÉSINEUX							
I-RW-300-24	0,9	39	2,4	15	0,53	3,43	21,8
I-RW-300-24	0,7	241	2,9	26	0,94	4,86	34,2
I-RW-300-48	0,9	72	4,0	24	1,01	5,43	34,0
AirTerra	0,2	1197	6,5	6	4,41	0,90	18,0
Airex-RW-315	0,5	50	2,8	21	1,57	2,33	28,0
BP-Res-400	1,2	1110	15,3	10	1,48	0,79	27,5
Airex-RW-426	0,5	297	3,4	20	0,82	2,93	27,1
Airex-Res-427	0,3	221	4,6	1	0,03	0,50	6,4
Airex_2_AGRICAN	0,1	172	8,4	3	0,74	0,45	12,5
Airex_201_AGRICAN	0,1	177	9,5	3	0,78	0,38	13,6
Airex_august_2016_AAC	0,2	348	2,9	3	0,29	0,21	6,6
Airex_may_2016_AAC	0,1	197	4,7	3	0,40	0,42	8,1
Airex-Res-454	0,2	209	3,6	3	0,64	0,20	7,8
Pyrovac_BR_UF_475	0,0	135	0,5	1	0,06	0,10	1,7
BP-Res-500	1,3	3722	13,4	9	1,25	0,71	24,3
Pyrobiom	0,3	791	4,7	12	0,54	0,24	17,9
Pyr-Res-475	0,5	755	10,9	63	6,62	1,62	82,6
Pyr-Res-500-aged	0,5	467	10,3	47	4,12	0,57	62,1
BOIS MOUX NON RÉSINEUX							
Coolterra	0,4	639	8,7	1	0,44	3,95	13,6
BP-Birch-400	0,9	1415	4,8	9	0,96	0,26	15,0
BP-Willow-400	1,0	756	10,9	17	1,22	0,52	29,8
BP-Willow-450-2013	1,1	1699	32,0	17	2,61	4,33	56,4
BP-Willow-450-2014	0,9	1033	24,4	11	1,28	0,49	36,9
BP-Birch-500	1,0	459	16,5	18	1,19	0,56	36,1
BP-Willow-500	1,1	1259	27,3	21	1,66	0,52	50,9
BP-Willow-550	1,2	1620	28,5	6	1,15	3,50	39,2
NON LIGNEUX							
B-Corn-300	0,9	1780	26,5	1	0,78	0,50	28,6
I-Cabbage-300-48	3,7	9348	138,5	21	6,17	18,63	184,8
I-Leek-300-48	5,7	7029	137,4	14	6,96	1,22	160,0
I-Potato-300-24	2,9	10544	117,4	0	1,71	0,43	119,9
BP-Phragmite-400	1,2	1383	10,8	14	0,99	1,36	26,7
BP-Phragmite-500	1,2	1103	12,0	6	0,62	1,52	20,1
FUMIERS							
IRDA-manure-500	4,5	22796	30,9	8	4,72	6,49	50,2
Chicken manure	2,7	44909	95,7	6	2,65	26,77	131,2
Moyenne de 3 réplicats							

(mg L⁻¹, RELATIVES AU TRANSPORT DE CONTAMINANTS ET AUX PLANTES)Moyenne de 3 réplicats

(mg L⁻¹, RELATIVES À L'ENVIRONNEMENT)

BIOCHARS	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
BOIS DURS										
B-Eu-300	0,0	0,0	3,5	1,2	9,5	0	0,0	0,0	0,00	17,96
Maple_101_AGRICAN	0,0	0,5	0,0	0,0	20,0	0	0,7	0,0	0,00	348,70
Mapple_2_AAC_2016	0,0	0,0	0,0	0,0	8,8	0	0,6	0,0	0,00	103,27
Leaf-Maple-350	0,0	5,3	0,0	3,4	19,7	0	7,0	2,0	0,00	289,00
Vietnam	0,0	0,0	1,8	1,7	32,5	0	1,9	0,0	0,00	54,95
BQ-Maple-500-1	0,0	1,0	0,0	5,2	10,3	0	4,7	1,6	0,00	29,33
BQ-Maple-500-2	0,0	3,0	0,0	3,5	21,7	0	9,3	4,9	0,00	185,00
BQ-Maple-500-3	0,0	0,0	0,3	0,2	6,1	0	2,7	0,0	15,95	26,46
Award-Maple-700	0,0	5,3	0,0	3,5	21,3	0	6,3	7,1	0,00	301,67
BOIS MOUX RÉSINEUX										
I-RW-300-24	27,0	0,0	0,0	1,3	41,3	0	2,0	45,1	0,00	20,42
I-RW-300-24	60,8	0,2	5,5	14,5	70,7	0	22,4	180,1	0,00	149,17
I-RW-300-48	40,6	0,0	1,7	4,9	24,1	0	2,0	51,0	0,00	150,66
AirTerra	0,0	0,0	1,9	0,8	19,8	0	2,0	0,0	0,00	62,16
Airex-RW-315	2,5	0,0	1,7	3,8	10,5	0	6,7	66,6	9,14	40,00
BP-Res-400	0,0	0,0	3,3	6,3	17,0	0	34,9	0,0	0,00	54,21
Airex-RW-426	72,1	0,0	2,7	22,6	54,9	0	23,6	184,4	27,46	130,19
Airex-Res-427	0,0	0,0	0,0	3,7	12,7	0	4,7	0,0	0,00	27,00
Airex_2_AGRICAN	0,0	0,2	0,0	1,1	14,1	0	1,6	0,0	0,00	398,26
Airex_201_AGRICAN	0,0	0,2	0,0	0,6	13,2	0	1,4	0,0	0,00	307,71
Airex_august_2016_AAC	0,0	0,0	1,2	9,0	5,8	0	3,5	0,0	0,00	127,91
Airex_may_2016_AAC	0,0	0,0	1,6	18,5	9,8	0	13,2	0,0	0,00	138,37
Airex-Res-454	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	0	1,5	0,0	0,00	13,13
Pyrovac_BR_UF_475	0,0	0,0	0,1	2,2	9,5	0	3,5	0,0	0,00	118,01
BP-Res-500	0,0	0,0	0,0	6,2	13,5	0	23,0	0,0	13,97	73,86
Pyrobiom	0,0	0,0	17,9	812,8	31,6	5	393,7	0,0	0,00	179,90
Pyr-Res-475	0,0	0,0	0,0	6,4	15,3	0	8,3	4,4	0,00	195,33
Pyr-Res-500-aged	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4	0	4,5	0,0	19,91	63,35
BOIS MOUX NON RÉSINEUX										
Coolterra	0,0	0,2	0,0	0,2	13,0	0	1,1	0,0	0,00	64,65
BP-Birch-400	0,0	0,0	1,7	4,1	11,1	0	12,4	0,0	0,00	55,30
BP-Willow-400	18,9	1,2	7,1	17,7	86,4	0	40,2	207,5	0,00	289,66
BP-Willow-450-2013	0,0	3,2	1,0	33,0	72,0	0	63,3	1,7	0,00	379,00
BP-Willow-450-2014	0,0	0,4	4,3	6,9	27,8	0	38,7	0,0	0,00	151,38
BP-Birch-500	0,0	0,0	0,3	5,1	26,8	0	35,1	0,0	13,02	87,54
BP-Willow-500	0,0	0,0	0,0	5,9	20,0	0	22,0	1,5	11,46	135,93
BP-Willow-550	0,0	1,8	1,0	23,1	74,7	0	43,0	0,0	0,00	454,67
NON LIGNEUX										
B-Corn-300	0,0	0,0	1,4	0,2	6,1	0	0,0	0,0	0,00	138,72
I-Cabbage-300-48	0,0	0,0	1,3	0,0	6,0	0	1,9	0,0	0,00	6,59
I-Leek-300-48	0,0	0,0	1,1	0,4	12,9	0	0,4	0,0	0,00	47,73
I-Potato-300-24	0,0	0,0	0,0	0,0	29,8	0	1,9	15,4	0,00	30,72
BP-Phragmite-400	0,0	0,0	13,0	20,8	27,7	1	51,6	4,6	0,00	42,25
BP-Phragmite-500	0,0	0,0	1,6	22,3	23,5	0	67,8	5,7	25,75	93,22
FUMIERS										
IRDA-manure-500	0,0	0,0	15,9	1,4	555,6	3	0,0	0,0	0,00	326,32
Chicken manure	0,0	0,3	0,0	9,7	88,3	11	14,7	0,0	0,00	2649,40
Moyenne de 3 réplicats										

5.4. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES

Seulement deux propriétés biologiques ont été mesurées (Figs. 3-6) soit l'appréciation des vers de terre pour un mélange de terre à jardin avec 10 ou 50 % v/v par rapport à de la terre à jardin seule, et le taux de germination de graines de laitues sur un milieu contenant de la terre à jardin avec 10 ou 50 % v/v de biochar. Dans tous les essais contenant du biochar, des vers de terre ont choisi le mélange terre à jardin avec biochar. Certains biochars tels que Vietnam, Coolterra, Air Terra et Pyrobiom semblent moins attirants pour les vers de terre à une concentration de 50 % qu'à une concentration de 10 %, alors que d'autres semblent plus attirants à plus haute concentration (B-Eu-300, I-leek-300-48 et ceux faits de saule et de bouleau Willow... et BP-Birch-400).

Généralement, parmi tous les biochars, les vers de terre préfèrent ceux fabriqués de matières non ligneuses surtout lorsque la terre contient seulement 10 % de biochar et ce, même s'ils ont la possibilité de choisir la terre à jardin seule (Fig. 3).

Lorsque la terre contient 50 % de biochar, ils préfèrent les biochars fabriqués de matières non ligneuses ou ceux de bois mou non résineux.

Les données de la germination de la laitue dans les mélanges de terre et de biochar montrent que la germination se produit dans tous les mélanges de terre à jardin contenant 10 % biochars, mais certains mélanges à 50 % de biochar montrent un taux de germination nul ou très faible comme ceux faits de choux, poireaux et fumier de poulet. La vitesse et le taux de germination varient. À une concentration de 10 % dans la terre, certains biochars semblent retarder la germination de quelques jours. À 10 jours, les taux de germination varient de 67 à 98 %. À une concentration de 50 % de biochar, 3 biochars (I-cabbage-300-48,

I-leek-300-48 et Chicken manure) arrêtent la germination de toutes les graines à 50% V/V. De plus, la germination avec certains biochars a été retardée par rapport à une concentration de 10 %, possiblement à cause du pH élevé.

Par conséquent, les biochars ne sont pas toxiques pour l'activité biologique. Par contre, ils peuvent ralentir les activités s'ils sont en concentration extrêmement élevée comme c'est le cas de nos essais avec 50 % de biochar.



FIGURE 3. PRÉFÉRENCE DU VER DE TERRE POUR LA TERRE NOIRE SEULE (0% BIOCHAR) OU UN MÉLANGE DE TERRE NOIRE AVEC 10% V / V BIOCHAR

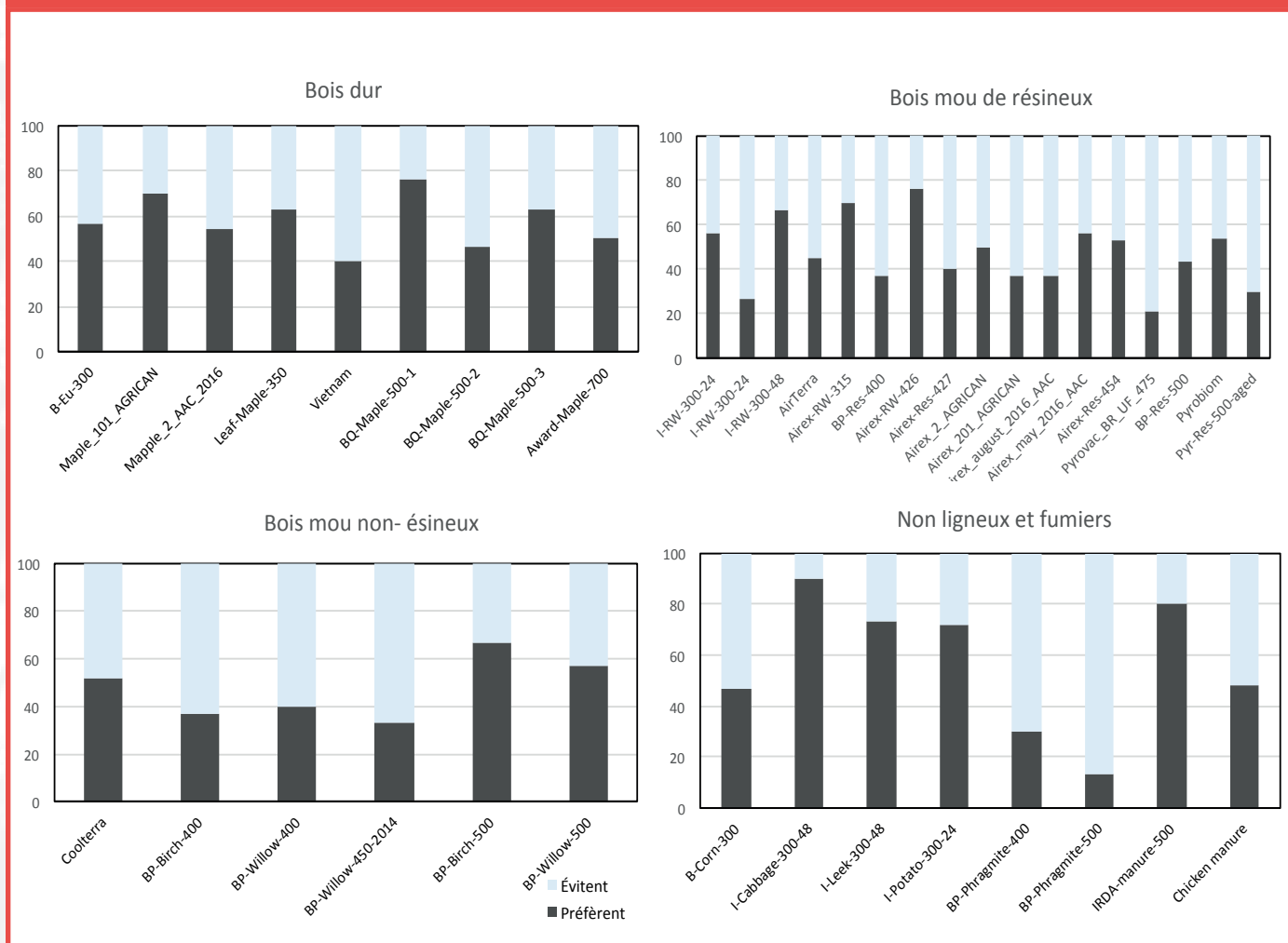


FIGURE 4. PRÉFÉRENCE DU VER DE TERRE POUR LA TERRE NOIRE SEULE (0% BIOCHAR) OU UN MÉLANGE DE TERRE NOIRE AVEC 50% V / V BIOCHAR

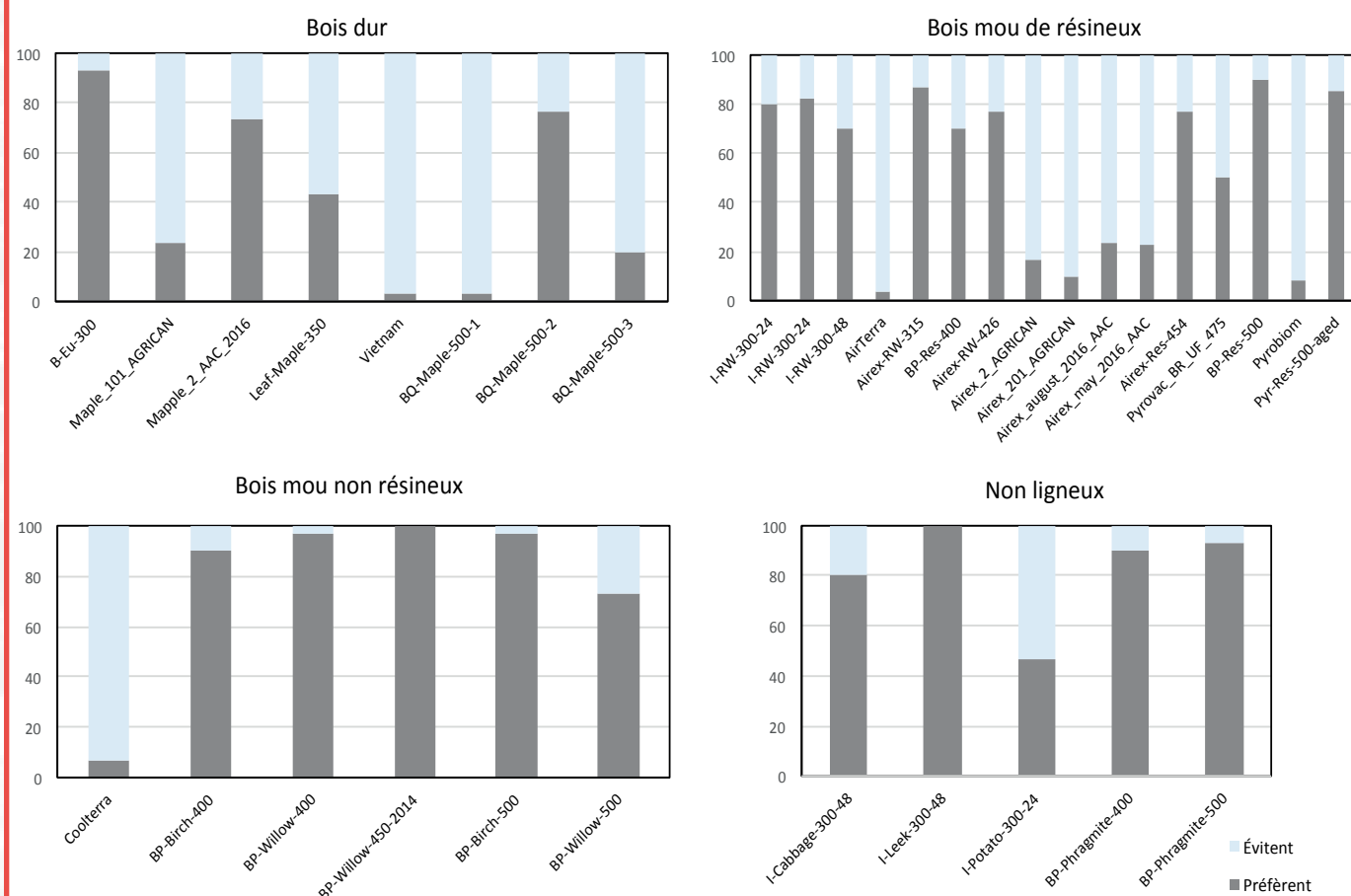


FIGURE 5. TAUX DE GERMINATION DE LA LAITUE DANS LA TERRE À JARDIN AMENDÉE DE 10 % V/V DE BIOCHAR

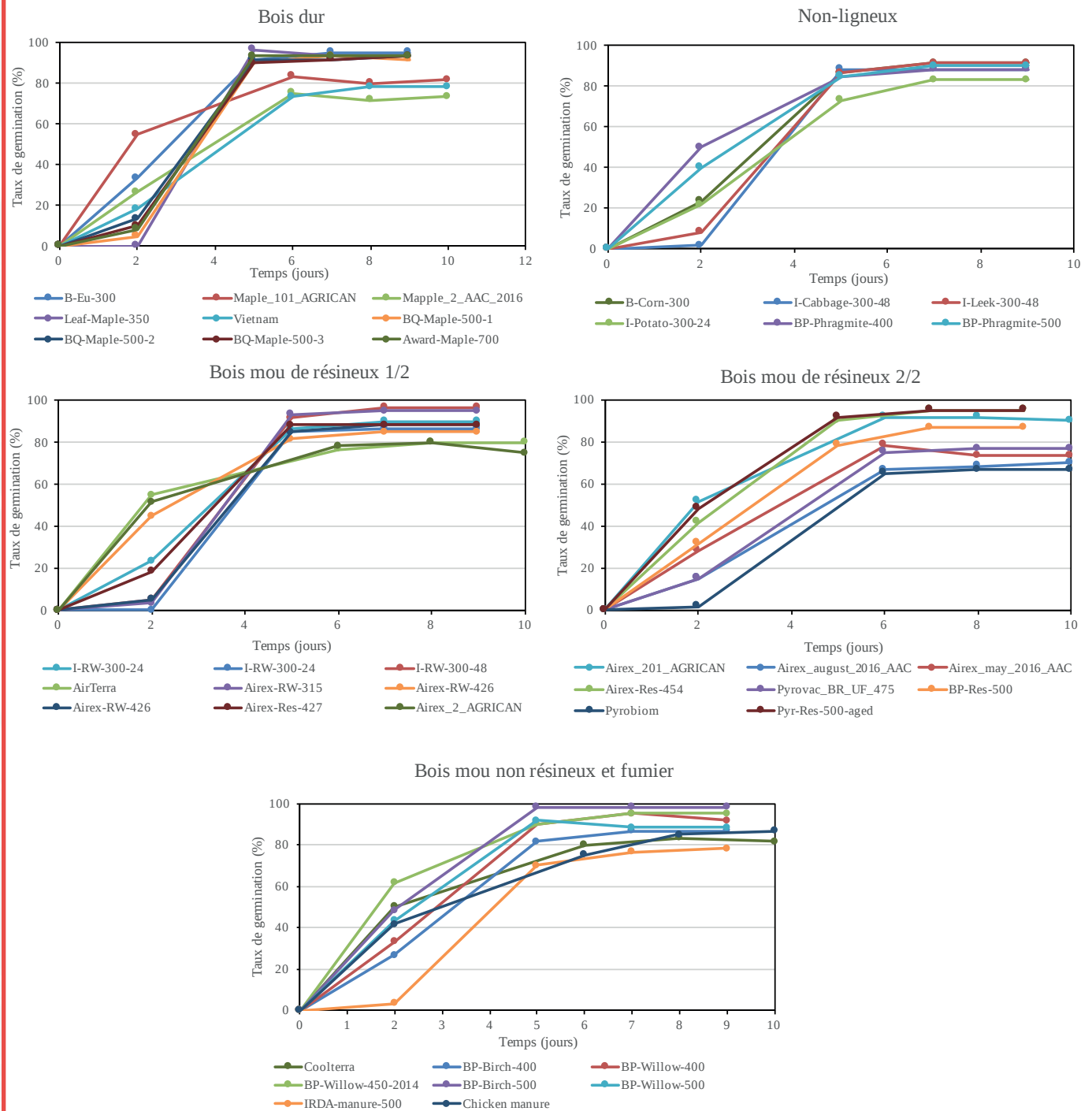
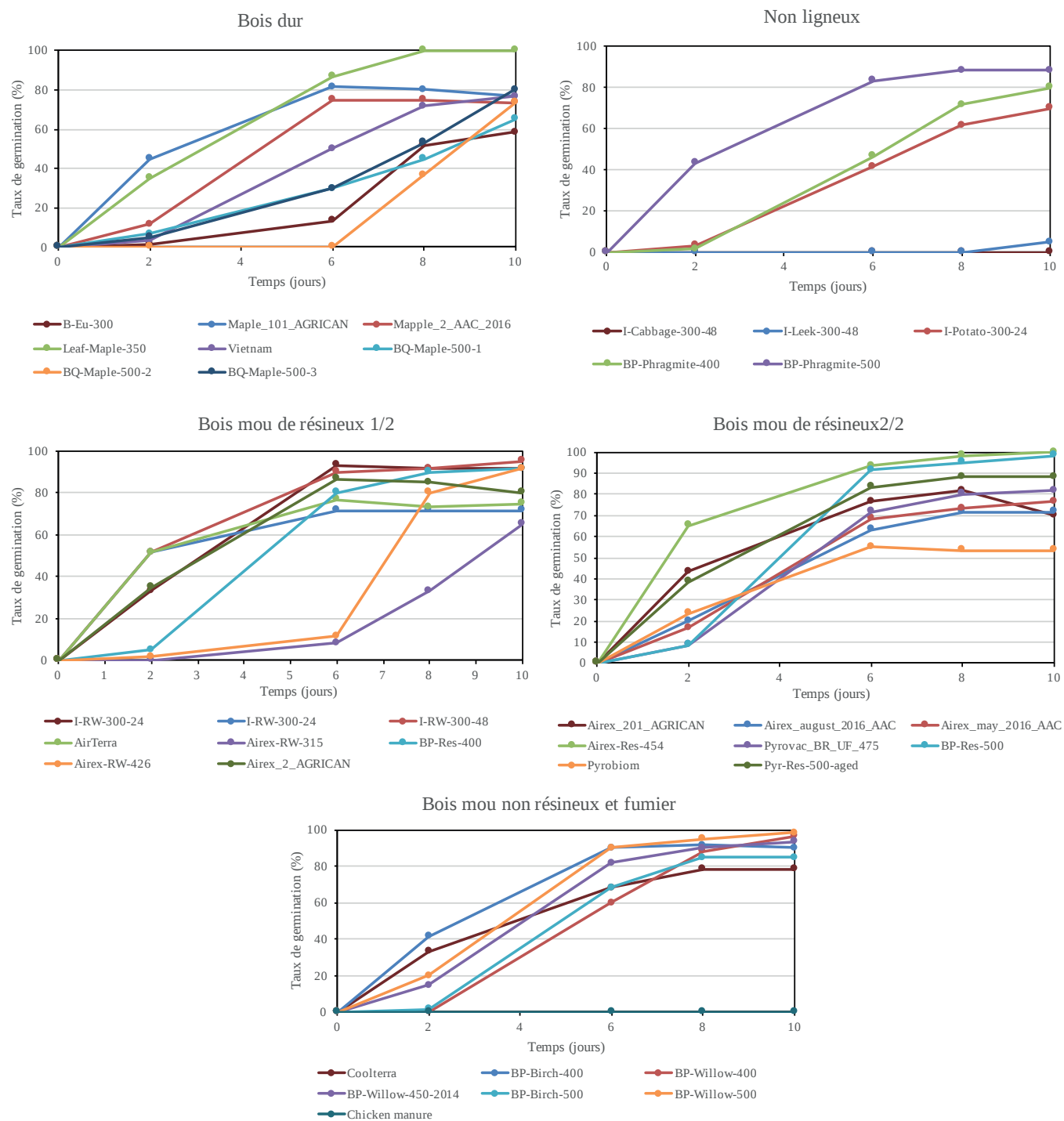
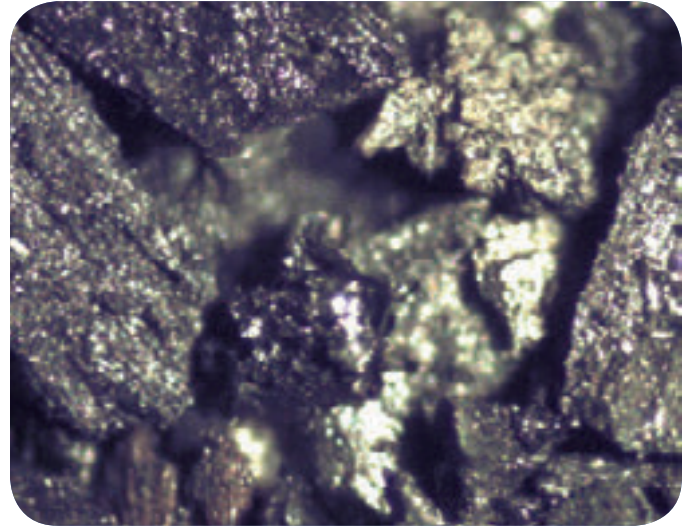


FIGURE 6. TAUX DE GERMINATION DE LA LAITUE DANS LA TERRE À JARDIN AMENDÉE DE 50 % V/V DE BIOCHAR



6. Conclusion et travaux futurs



Ce document revêt de l'importance pour sa liste des méthodes d'analyse ainsi que pour montrer la très grande variété des propriétés physicochimiques des biochars retrouvés au Québec. Il sert aussi à situer chaque entreprise parmi la gamme de biochars retrouvés au Québec actuellement avec des technologies québécoises et à les comparer avec certains biochars vendus sur le marché mondial. Nous pouvons, à partir de ces données, évaluer l'influence d'une méthode de pyrolyse sur les propriétés des biochars (ex. : tous les Airex comparés entre eux et tous les BP comparés entre eux), l'influence de la matière (ex. : tous les BP d'une même matière comparés entre les températures de fabrication), et le potentiel de différentes matières pour la pyrolyse.

Plusieurs travaux ont été ou seront publiés prochainement avec ces données. Voici une liste partielle des thèses, articles, rapports et présentations dans lesquels sont décrits les biochars utilisés dans ce rapport et/ou qui ont utilisé ces analyses pour sélectionner le biochar à inclure dans leur étude.

7. Travaux reliés aux biochars décrits dans ce document

Voici une liste partielle des travaux qui sont en lien avec ces biochars. Soit que les caractéristiques ont été mesurées pour répondre à différents objectifs d'explications, soit pour aider à la sélection des biochars.

7.1. THÈSES ET MÉMOIRES

- Djousse, Boris Merlain (2017) Production et utilisation du biochar pour la restauration des sols rouges lessivés tropicaux. Ph.D thèse. Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Greffard, Laurence (2017) Potentiel de terreaux de restauration à base de biochar, de cendre et de matières résiduelles fertilisantes pour la croissance d'*Alnus incana ssp rugosa* et *Calamagrostis canadensis* : une stratégie de mise en végétation de rejets miniers. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Jean, Roudy (2017) Développement d'un mélange d'hydro ensemencement herbacé pour la phytorestauration de résidus miniers aurifères. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Asmara, Degi Harja (2017) Agroforestry on degraded land: Ecological restoration of gold mining sites using biochar, microorganisms and other amendments. Ph.D thèse. Université Laval, Québec, Qc, Canada (en cours).
- Auclair, Isabelle (2017) Production de biocharbon par torréfaction/pyrolyse de résidus de culture maraîchère et de bois recyclé et étude de leurs caractéristiques pour une utilisation au sol. Ph.D thèse. Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Qc, Canada (en cours).
- Baril, Benjamin (2013) Contenu en carbone du panic érigé et du sol amendé avec du biochar et une inoculation microbienne. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec, Qc, Canada.

7.2. ARTICLES SCIENTIFIQUES AVEC COMITÉ DE LECTURE

- Lange, S.F., S.E. Allaire, D. Paquet (2017) Substrates containing biochar for white spruce production (*Picea Glauca sp.*) in nursery: growth, economic aspect and carbon sequestration. Accepté avec corrections par le New Forest Journal.
- Auclair, I., S.E. Allaire, S. Barnabé. 2018. Carbonaceous properties of biochars manufactured with vegetable crop residues and recycled woods. En cours.
- Auclair IK, Allaire SE, Barnabé S. (2018) Water and moisture retention of biochars manufactured with vegetable crop residues and recycled woods. En cours.
- Charles, A., S.E. Allaire, S. Lange, E. Smirnova (2017) Physical properties of biochars and relationship with feedstock and pyrolysis technologies. En cours.
- Djousse, B.M., S.E. Allaire, A. D. Munson (2017) Quality of biochar made of eucalyptus tree barks and corncob using a pilot scale retort kiln. Waste and Biomass Valorization. Doi 10.1007/s12649-617-9844-2
- Djousse, B.M, S.E. Allaire, A. D. Munson (2017) Quantifying the influence of Eucalyptus bark and corncob biochars on the physico-chemical properties of a tropical oxisol under maize cultivation. Soumis à Soil and Tillage Research.
- Djousse, B.M, S.E. Allaire, A. D. Munson (2017) Biochar improves maize nutritional status and yield under two soil tillage modes. Soumis à Journal of Soil Science and Plant Nutrition.
- S.E. Allaire, A. Vanasse, B. Baril, S.F. LANGE, J. MacKay, D. Smith (2015) Carbon dynamic under switchgrass produced in a loamy soil amended with biochar. Can. J. Soil Sci. 95: 1-13.
- Shanta, N., T. Schwinghamer, R. Backer, S.E. Allaire, I. Teshler, A. Vanasse, J. Whalen, B. Baril, S.F. Lange, J. MacKay, X.Zhou, D.L. Smith (2016) Biochar and plant growth promoting rhizobacteria effects on switchgrass (*Panicum virgatum* cv. Cave-in-Rock) for biomass production in southern Québec depend on soil type and location. Biomass and Bioenergy. 95: 167-173

7.3. ARTICLES DE VULGARISATION

- Smirnova E., S.E. Allaire, M. Beaudoin Nadeau (2017) Regreening with biochar, biofertilizers, liming sludges, and ashes of degraded lands. Canadian Reclamation, Automne/Hiver 2017. p. 34-35.
- Côté, J.-F., S.E. Allaire (2017) Forêt et matière ligneuse: l'or vert du Québec; Biochar: l'or noir de la forêt. Ressources Mines et industrie, vol. 4, no. 3. p. 48-52.
- Allaire, S., S.F. Lange (2013) Le biochar dans les milieux poreux : une solution miracle en environnement ? Vecteur environnement 46 (4) : 58-67.

7.4. RAPPORTS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- Smirnova, E., S.E. Allaire, S. Lange, A. Charles (2018) Relationship between various properties of biochars and effect of technology and feedstock on these properties. Rapport CRMR-2017-SA2. En cours.
- Allaire, S.E. S.F. Lange (2017) Rapport final. Substrats horticoles à base de biochars produits de matières résiduelles locales en circuit court. CRMR-2017-SA-1. Centre de recherche sur les matériaux renouvelables, Université Laval, Québec, Canada, 40 p.
- Papillon, P.A., S.E. Allaire, S.F. Lange (2016) Substrats horticoles à base de biochars produits de matières résiduelles locales en circuit court. Rapport annuel. Projet Innov-Action. Centre de recherche sur les matériaux renouvelables, CRMR-2016-SA-1, Université Laval, Québec, Canada, 38 pp.
- Allaire, S.E., S.F. Lange, I.K. Auclair, M. Quinche, L. Greffard (The Char Team) (2015) Report: Analyses of biochar properties. CRMR-2015-SA-5. Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, Université Laval, Québec, Canada, 59 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2789.4241

- Lange, S.F., S.E. Allaire (2015) Essai de terreaux contenant du char pour la culture d'épinettes blanche (*Picea glauca*) : Projet CRSNG-Engage en collaboration avec la pépinière Somival Inc., Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, CRMR-2015-SA-4, Université Laval, Québec, Canada, 55 pp.
- Allaire, S.E., S.F. Lange, I.K. Auclair, M. Quinche, L. Greffard (The Char Team) (2015) Rapport : Analyse des propriétés de biochars, Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, CRMR-2015-SA-3, Université Laval, Québec, Canada, 61 p.
- Allaire, S.E., I.K. Auclair, S.F. Lange (2015) Rapport préliminaire : Analyse comparative des propriétés de biochars dans le cadre du projet CRIBIQ-Innofibre-UQTR-U Laval, Centre de recherche sur les matériaux renouvelables, CRMR-2015-SA-1, Université Laval, Québec, Canada, 49 p.
- Greffard L., Allaire S.E., Smirnova E. (2015) Revégétalisation de sites miniers aurifères avec des produits de la pyrolyse et des aulnes. Rapport de progrès présenté aux partenaires et MITACS.
- Allaire S.E., M. Quinche (2015) Efficacité environnementale des bandes riveraines aménagées avec *Salix* et amendées au biochar. CRMR-2015-SA-2. Centre de recherche sur les matériaux renouvelables, Université Laval, Québec, Canada, 51 p. Remis aux partenaires privés.
- Allaire S.E., M. Quinche (2015) Efficacité environnementale des bandes riveraines aménagées avec *Salix* et amendées au biochar. CRMR-2015-SA-2. Centre de recherche sur les matériaux renouvelables, Université Laval, Québec, Canada, 51 p. Remis aux partenaires privés.
- Auclair I (2014) Production de biocharbon par torréfaction de résidus maraîchers et lignocellulosiques et étude de leurs caractéristiques pour une utilisation au sol. (UQTR-CRML-IA-03), Université du Québec à Trois-Rivières, Centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques, Trois-Rivières (Qc), 55 p.
- Auclair I (2013) Les analyses de résidus agroalimentaires (choux, poireaux, pommes de terre). (UQTR-CRML-IA-02), Université du Québec à Trois-Rivières, Centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques, Trois-Rivières (Qc), 9 p.
- Auclair I (2013) L'utilisation du biochar pour le cours de procédés de conversion thermochimique (PNA-6027), 17 avril 2013, Centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières (Qc), 11 p.
- Quinche M., S.E. Allaire (2014) Efficacité environnementale des bandes riveraines aménagées avec *Salix* et amendées au biochar. Report no. CRH-103. Remis à Biopterre, au gouvernement et aux partenaires privés. 27 p.
- Allaire, S.E., S.F. Lange, F. Marquis, A. Lamarque (2012) Caractérisation physico-chimiques du biochar Pyrovac. Rapports d'analyse 201. Centre de recherche en horticulture, Université Laval. 16pp.
- Allaire, S.E., S.F. Lange, F. Marquis, A. Lamarque (2012) Caractérisation physico-chimiques du biochar Airex. Rapports d'analyse 101. Centre de recherche en horticulture, Université Laval. 16pp.

7.5. PRÉSENTATIONS

- Allaire, S.E. 2017. La pyrolyse, une solution aux matières résiduelles d'une région? Séance d'information. Synergie Matane, Matane, Qc, Canada, 2 nov. 2017. Conférencière invitée.
- Allaire, S.E. 2017. La pyrolyse, une solution pour des résidus forestiers? Colloque forestier du sud du Québec. Prévus 20 octobre 2017, St-George, Qc, Canada., Conférencière invitée.
- Allaire, S.E. 2017. Les marchés des biochars. Défis industriels et environnementaux de la filière du biochar. Organisée par le CRIBIQ, Nicolet, Qc, Canada, 16-17 oct. Conférencière invitée.
- Auclair, I. (2017) Production de biocharbon par torréfaction de résidus maraîchers et lignocellulosiques et, l'étude de leurs caractéristiques pour une utilisation agricole. 4e édition du colloque étudiant : Les procédés verts pour la bioéconomie de demain, 26 septembre 2017, Université Laval, Québec (Qc), 21 p.

- Allaire, S.E. 2016. Le biochar : Une solution pour recycler les matières résiduelles et aider l'environnement? Colloque sur la valorisation des matières résiduelles. Sherbrooke, Qc, Canada, 26 oct. Conférencière invitée.
- Allaire, S.E. 2016. Le biochar, une solution pour recycler les matériaux résiduels et aider les sites nordiques? Colloque regard sur le nord. St-Prime, Canada, Juin 2016. Conférencière invitée.
- Lange, S.F., S.E. Allaire (2016). Biochar classification tool. Congrès conjoint de la Canadian Society of Soil Science et de la Pacific Regional Society of Soil Science, Kamloops, BC , Canada.
- Lange, S.F., S.E. ALLAIRE (2015). Biochar as a component of potting soils: case studies. Congrès conjoint : Commission 2.5 of the International Union of oil Science; Canadian Society of Soil Science et l'Association québécoise des spécialistes en sciences du sol. Montréal, Qc, Canada.
- Allaire, S.E. 2015. Revegetalisation of degraded sites with biochar. Americana, congrès international Organisé par le Réseau Environnement, Montréal, Qc, Canada, 19 March. Conférencière invitée
- Allaire, S.E. 2014. Amélioration de l'efficacité des bandes riveraines grâce à l'ajout de char. Colloque FHOQ-gestion de l'eau. Drummundville 17 Sept. Conférencière invitée.
- Allaire, S.E. 2014. Revegetalisation of mine residues using char. CLRA annual meeting. Mont-Tremblant, Qc, Canada, 25-29 Sept. Conférencière invitée.
- Allaire, S.E. 2014. Le Biochar: une solution pour recycler les matériaux résiduels ligneux et agricoles? Colloque du CRMR. UQTR. Trois-Rivières, Qc, Canada, 14 May. Conférencière invitée, Auclair*, I.
- Allaire, S.E., S. Barnabé, and J.-P. Jacques. 2014. Production de biocharbon par torréfaction/pyrolyse de résidus de cultures maraîchères et de bois recyclé, et étude de leurs caractéristiques pour une utilisation au sol. Colloque du CRMR. UQTR. Trois-Rivières, Qc, Canada, 14 May. Conférencière invitée.
- Allaire, S.E., and E. Smirnova. 2014. Utilisation du biochar pour la revégétalisation de sites miniers. Colloque du CRIBIQ. Orford, Qc, Canada, 29 April. Conférencière invitée.
- Allaire, S.E., M. Quinche. 2014. Développement d'un diagnostic d'utilisation des biochars en agriculture et environnement. Colloquium on Biochar. Québec, Canada, Feb 27. Conférencière invitée.
- Allaire, S.E. (2014) Développement d'un diagnostic d'utilisation des biochars en agriculture et environnement. Colloquium on Biochar. Québec, Canada, Feb 27. Conférencière invitée.
- Auclair, I., Jacques, J.-P., Parenteau, M., Allaire S.E., Barnabé, S. (2014) Production de biocharbon par torréfaction pyrolyse de résidus de cultures maraîchères et de bois recyclé, et étude de leurs caractéristiques pour une utilisation au sol.» Colloque annuel du Centre de recherche sur les matériaux renouvelables, 14 mai 2014, Pavillon CIPP, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières (Qc), 18 p.
- Auclair, I., Allaire S.E. Jacques, J.-P., Parenteau, M., Barnabé, S. (2014) Le biochar en cycles maraîchers, Colloque Devenir du biochar : opportunités agricoles et environnementales, 27 février 2014, Pavillon Alphonse-Desjardins, Université Laval (Qc), 16 p.
- Jacques J-P., Auclair I (2014) Projet régional de torréfaction de résidus maraîchers et de bois recyclé. Présentation orale du 13 mai 2014, 82e Congrès de l'ACFAS du 12-16 mai 2014, Université de Concordia, Montréal (Qc), 23 p.
- Dufils., B. S.E. Allaire, D. Smith, A. Vanasse, S.F. Lange, P. Gagné, J. Mackay (2013). Biochar and poplar cultivation: Producing bioenergy and reducing emissions of greenhouse gases. Congrès annuel de la Société canadienne de biologie végétale. Québec (QC). Canada.
- Lange, S.F. S.E. Allaire. F. Marquis (2013). Physico-chemical properties of biochar. International Union of Soil Science: Global Soil Carbon Conference. Madison (WI). USA.
- Allaire, S.E., S.F. Lange, B. Baril, A. Vanasse, J. Mackay, D. Smith (2013). CO2 dynamic in biochar amended sandy loam for switchgrass production. International Union of Soil Science: Global Soil Carbon Conference. Madison (WI). USA.

- Allaire, S.E., S.F. Lange, B. Baril, A. Vanasse, J. MacKay, D. Smith (2013). Dynamique du CO₂ dans le sol de panic érigé amendé avec du biochar. Congrès annuel de l'Association québécoise des Spécialistes en Sciences du Sol. Chicoutimi (QC). Canada.
- Baril, B., S.E. Allaire, A. Vanasse, S.F. Lange, J. Mackay, D. Smith, I. Teshler, J. Whalen, N. Shanta (2012). Carbon contribution in switchgrass production amended with biochar and microbial fertilization. Congrès annuel conjoint de la Canadian Soil Science Society et de l'Association québécoise des spécialistes en sciences du sol. Lac-Beauport (QC), Canada.

8. Références

- Agrinova (2013) Valorisation agronomique des digestats de méthanisation, Recherche documentaire. Centre collégiale de transfert de technologie. p. 22. http://www.agrireseau.qc.ca/energie/documents/Synth%C3%A8se_recherche_documentaire_vfinale.pdf (read in January 2015).
- Ahmed S, Hammond J, Ibarrola R, Shackley S, Haszeldine S (2012) The potential role of biochar in combating climate change in Scotland: An analysis of feedstocks, life cycle assessment and spatial dimensions. *Journal of Environmental Planning and Management*, 55: 487-505.
- Allaire SE, Baril B, Vanasse A, Lange SF, Mackay J, Smith DL (2015) Carbon dynamic under switchgrass produced in a loamy soil amended with biochar. *Canadian Journal of Soil Science*. DOI : 10.4141/cjss-2014-042.
- Allaire SE, Parent LE (2003) Size guide number and Rosin-Rammler approaches to describe particle size distribution of granular organic-based fertilisers. *Biosystems Engineering* 86 :503-509 DOI:10.1016/j.biosystemseng.2003.08.009.
- Allaire SE, Parent LE (2004a) Physical properties of granular organic-based fertilisers, Part 1 : Static properties. *Biosystems Engineering* 87: 78-87.
- Allaire SE, Parent LE (2004b) Physical properties of granular organic-based fertilisers, Part 2 : Dynamic properties related to water. *Biosystems Engineering* 87: 225-236.
- ASTM (2010) Standard Test Method for Metal Powder Skeletal Density by Helium or Nitrogen Pycnometry, ASTM B923-10. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. www.astm.org. DOI: 10.1520/B0923-10.
- ASTM (2010) Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon, ASTM D2862-10.USA: 2010 <http://www.astm.org/Standards/D2862.htm> (Read in January 2015).
- ASTM (2012) Standard test method for carbon black – Total and external surface area by nitrogen adsorption. ASTM D6556-10. 5 p.
- ASTM (2013) Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM D1762-84. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org. DOI: 10.1520/D1762.
- ASTM (2013) Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils, ASTM D4373-02. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. www.astm.org. DOI: 10.1520/D4373-02.

- Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles JL, Harris E, Robinson B, Sizmur T (2011) A review of biochars potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution* 159: 3269-3282.
- Biederman LA, Harpole WS (2013) Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB bioenergy* 5:202-214.
- Blake GR, Hartge KH (1986) Bulk Density, p. 363-375, In Klute A (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph no. 9, 2nd ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Brewer CE (2012) Biochar characterization and engineering. Graduate Thesis and Dissertations. Iowa State University. Paper 12284.
- Brewer CE, Hu YY, Schmidt-Rohr K, Loynachan TE, Laird DA, Brown RC (2012) Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. *Journal of environmental quality* 41: 1115-1122.
- Cayuela ML, Van Zwieten L, Singh BP, Jeffery S, Roig A, Sánchez-Monedero MA (2014) Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 191: 5-16.
- CEAEQ (2003) Détermination de la matière organique par incinération : Méthode de perte de feu (PAF) MA. 1010 – PAF 1.0. Centre d'expertise en Analyse Environnementale du Québec. Ministère de l'Environnement du Québec, 2003, 9 p. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs35531>.
- CEAEQ (2009) Protocole pour la validation d'une méthode d'analyse en chimie, DR-12-VMC. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Québec, 9 juin 2009. 29 p. http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/pala/dr12vmc_protocole_val_chimie.pdf.
- CEAEQ (2011) Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : Dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse. MA. 400 – HAP 1.1, Rév. 4. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2011, 27 p.
- CEAEQ (2013) Détermination du carbone et du soufre : méthode par combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge, MA.310-CS 1.0, Rév.3. MDDEFPP. 8 p. <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA310CS10.pdf>.
- CFI (2001) Bulk Blend. Quality Control Manual. Canadian Fertilizer Institute, Ontario, Canada.
- CQVB (2011) Le biochar : Outil pour la gestion des résidus de biomasse et la fertilité des sols. Biotendance. Conseil de production végétale du Québec. 12 p. <http://www.cqvb.qc.ca/> (consulté en janvier 215).
- Crane-Droesch A, Abiven S, Jeffery S, Torn MS (2013) Heterogeneous global crop yield response to biochar: A meta-regression analysis. *Environmental Research Letters* 8: 044049.
- Dutta B, Raghavan V (2014) A life cycle assessment of environmental and economic balance of biochar systems in Quebec. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 5 : 1-11. <http://link.springer.com/article/10.1007/s40095-014-0106-4/fulltext.html> (consulté en janvier 2015).
- EBC (2012) Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.'European Biochar Certificate. Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org/en/download>. Version 4.8 of 13th December 2013. <http://www.european-biochar.org/biochar/media/doc/ebc-guidelines.pdf> (consulté en janvier 215).
- Egger M, Smith GD, Phillips AN (1997) Meta-analysis: Principles and procedures. *BMJ* 315: 7121: 1533-1537.
- Enders A, Lehmann J (2012) Comparison of wet digestion and dry ashing methods for total elemental analysis of biochar. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 43: 1042-1052.
- Flint LE, Flint AL (2002) Porosity. In: Dane JH, Topp GC (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, p. 241-254.
- Galgani P, van der Voet E, Korevaar G (2014) Composting, anaerobic digestion and biochar production in Ghana. Environmental-economic assessment in the context of voluntary carbon markets. *Waste Management* 34 : 2454-2465.

- Gariépy MC, Lacroix C (2013) Portrait de la production porcine québécoise. Centre de Développement du porc du Québec. (<http://www.cdpq.ca/getattachment/Information-sur-le-secteur-porcin/Indicateurs-de-performance/Portrait-de-la-production-porcine-quebecoise.pdf.aspx>) (consulté en janvier 2015).
- Gomez-Eyles JL, Beesley L, Moreno-Jimenez E, Ghosh U, Sizmur T (2013) The potential of biochar amendments to remediate contaminated soils. *Science Publishers: Enfield, NH*. DOI: 10.13140/2.1.1074.9448.
- Hammond J, Shackley S, Sohi S, Brownsort P (2011) Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. *Energy Policy* 39: 2646-2655.
- Hossain MK, Strezov V, Chan KY, Ziolkowski A, Nelson PF (2011) Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management* 92:223-228. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/other/eur24099.pdf.
- Huang IB, Keisler J, Linkov I (2011) Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment* 409: 3578-3594.
- Ibarrola R, Shackley S, Hammond J (2012) Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment. *Waste Management* 32: 859-868.
- IBI (2012) Standardized definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. International Biochar Initiative. IBI-STD-01. 47 p.
- CEAEQ (2009) Protocole pour la validation d'une méthode d'analyse en chimie, DR-12-VMC. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Québec, 9 juin 2009. 29 p. http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/pala/dr12vmc_protocole_val_chimie.pdf.
- CEAEQ (2011) Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : Dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse. MA. 400 – HAP 1.1, Rév. 4. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2011, 27 p.
- CEAEQ (2013) Détermination du carbone et du soufre : méthode par combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge, MA.310-CS 1.0, Rév.3. MDDEFPP. 8 p. <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA310CS10.pdf>.
- CFI (2001) Bulk Blend. Quality Control Manual. Canadian Fertilizer Institute, Ontario, Canada.
- CQVB (2011) Le biochar : Outil pour la gestion des résidus de biomasse et la fertilité des sols. Biotendance. Conseil de production végétale du Québec. 12 p. <http://www.cqvb.qc.ca/> (consulté en janvier 215).
- Crane-Droesch A, Abiven S, Jeffery S, Torn MS (2013) Heterogeneous global crop yield response to biochar: A meta-regression analysis. *Environmental Research Letters* 8: 044049.
- Dutta B, Raghavan V (2014) A life cycle assessment of environmental and economic balance of biochar systems in Quebec. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 5 : 1-11. <http://link.springer.com/article/10.1007/s40095-014-0106-4/fulltext.html> (consulté en janvier 2015).
- EBC (2012) Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Certificate. Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org/en/download>. Version 4.8 of 13th December 2013. <http://www.european-biochar.org/biochar/media/doc/ebc-guidelines.pdf> (consulté en janvier 215).
- Egger M, Smith GD, Phillips AN (1997) Meta-analysis: Principles and procedures. *BMJ* 315: 7121: 1533-1537.
- Enders A, Lehmann J (2012) Comparison of wet digestion and dry ashing methods for total elemental analysis of biochar. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 43: 1042-1052.
- Flint LE, Flint AL (2002) Porosity. In: Dane JH, Topp GC (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, p. 241-254.
- Galgani P, van der Voet E, Korevaar G (2014) Composting, anaerobic digestion and biochar production in Ghana. Environmental-economic assessment in the context of voluntary carbon markets. *Waste Management* 34 : 2454-2465.

- Gariepy MC, Lacroix C (2013) Portrait de la production porcine québécoise. Centre de Développement du porc du Québec. (<http://www.cdpq.ca/getattachment/Information-sur-le-secteur-porcin/Indicateurs-de-performance/Portrait-de-la-production-porcine-quebecoise.pdf.aspx>) (consulté en janvier 2015).
- Gomez-Eyles JL, Beesley L, Moreno-Jimenez E, Ghosh U, Sizmur T (2013) The potential of biochar amendments to remediate contaminated soils. Science Publishers: Enfield, NH. DOI: 10.13140/2.1.1074.9448.
- Hammond J, Shackley S, Sohi S, Brownsort P (2011) Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. Energy Policy 39: 2646-2655.
- Hossain MK, Strezov V, Chan KY, Ziolkowski A, Nelson PF (2011) Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. Journal of Environmental Management 92:223-228. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/other/eur24099.pdf.
- Huang IB, Keisler J, Linkov I (2011) Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. Science of the Total Environment 409: 3578-3594.
- Ibarrola R, Shackley S, Hammond J (2012) Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment. Waste Management 32: 859-868.
- IBI (2012) Standardized definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. International Biochar Initiative. IBI-STD-01. 47 p.
- ISO (2006) Direct reduced iron - Determination of carbon and/or sulfur-High-frequency combustion method with infrared measurement, ISO 9686:2006. 14 p. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9686:ed-2:v1:en>.
- ISO (2013) Fertilizers- Determination of bulk density (tapped). ISO 5311:1992 [https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std: iso:5311:ed-3:v1:en](https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5311:ed-3:v1:en).
- Jeffery S, Bezemer TM, Cornelissen G, Kuyper TW, Lehmann J, Mommer L, et al. (2015) The way forward in biochar research: Targeting trade-offs between the potential wins. GCB Bioenergy 7: 1-13. DOI/10.1111/gcbb.12132/pdf.
- Jeffery S, Verheijen FG, Van Der Velde M, Bastos AC (2011) A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, Ecosystems Environment 144: 175-187.
- Jeffrey et al. 2013. The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins. GCB Bioenerg. Doi/10.1111/gcbb.12132/pdf.
- Keleb E, Vermeire A, Vervae C, Remon JP (2004) Extrusion granulation and high shear granulation of different grades of lactose and highly dosed drugs: A comparative study. Drug Development and Industrial Pharmacy. 30 :679-691. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15285342>. (Read in January 2015).
- Kemper WD, Rosenau RC (1986) Aggregate stability and size distribution. p. 425- 442. In Methods of Soil Analysis, Klute A (ed.). ASA-SSSA. Madison, WI, USA.
- Kiekens F, Cordoba-Diaz M, Remon JP (1999) Influence of chopper and mixer speeds and microwave power level during the high-shear granulation process on the final granule characteristics. Drug Development and Industrial Pharmacy 25: 1289-1293.
- LECO (2009) Determinator instruction manual SC 632 Carbon / Sulfur, Version 1.4 X. August 2009.
- Lee JW, Hawkins B, Day DM, Reicosky, DC (2010) Sustainability: The capacity of smokeless biomass pyrolysis for energy production, global carbon capture and sequestration. Energy Environmental Science 3: 1695-1705.
- Lehmann J, Gaunt J., Rondon M (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems–A review. Mitigation and adaptation strategies for global change 11: 395-419.
- Liu et al. 2013b. Addition of external organic carbon and native soil organic carbon decomposition: A meta-analysis. PLOS ONE 8: e54779.
- Liu X, Zhang A, Ji C, Joseph S, Bian R, Li L, et al. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions–A meta-analysis of literature data. Plant and Soil 373: 583-594.

- Major J (2009) A guide to conducting biochar trials. International Biochar Initiative. 30 p.
- MAPAQ (2009) Plan d'action ministériel du développement durable 2009-2013. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation du Québec. 19 p. www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/planactiondevdurable.pdf (Read in January 2015).
- MDDELCC (1998) Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés: Annexe 2 : Les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines (http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_tableau_2.htm). (Read in April 2015).
- Meng CP, Hanif AHM, Wahid SA (2014) Short-term field decomposition and physico-chemical transformation of *Jatropha* pod biochar in acidic mineral soil. *Open Journal of Soil Science* 4: 226-234.
- Montanarella L, Lugato E (2013) The application of biochar in the EU: Challenges and Opportunities in Agronomy, 3: 462-473.
- OECD (1984) Guideline for testing of chemicals "Terrestrial Plants, Growth test" 208. Organisation for Economic Co-Operation and Development. 6 pages. <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/1948285.pdf>.
- Paré MC, Allaire SE, Khiari L, Nduwamungu C (2009) Physical properties of organo-mineral fertilizers. *Canadian Biosystems Engineering* 51: 3.21-3.27.
- Philibert A, Loyce C, Makowski D (2012) Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 148: 72-82.
- Rajkovich S, Enders A, Hanley K, Hyland C, Zimmerman AR, Lehmann J (2011) Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils* 48:271-284.
- Recyc-Québec (2014) Bilan 2012 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Gouvernement du Québec, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Bibliothèque et Archives Canada. 32 p. http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Bilan_2012_accessible.pdf. (Read in January 2015).
- Roberts KG, Gloy BA, Joseph S, Scott NR, Lehmann J (2009) Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science and Technology* 44: 827-833.
- Sohi S, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R (2010) A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105:47-82.
- Sparrevik M, Field JL, Martinsen V, Breedveld GD, Cornelissen G (2013) Life cycle assessment to evaluate the environmental impact of biochar implementation in conservation agriculture in Zambia. *Environmental Science and Technology* 47:1206-1215.
- Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, Joseph A, Cowie A (2010) Effect of biochar from slow pyrolysis of papermills waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327:235-246.
- Verheijen F, Jeffery S, Bastos AC, Van der Velde M, Diafas I (2010) Biochar application to soils – A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 149 p.
- Zhang W, Wang X, Wang S (2013) Addition of external organic carbon and native soil organic carbon decomposition: a meta-analysis. *PLOS One* 8: 2. DOI: 10.1371/journal.pone.0054779.